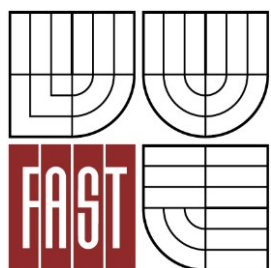




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A
DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND
COMPONENTS

NOVÉ MOŽNOSTI VYUŽITÍ LEHČENÝCH KAMENIV Z DRUHOTNÝCH SUROVIN

DEVELOPMENT OF FLOORING SYSTEMS WITH USAGE OF LIGHTWEIGHT AGGREGATE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JIŘÍ KŘUPALA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA, CSc.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Jiří Křupala
Název	Nové možnosti využití lehčených kameniv z druhotných surovin
Vedoucí diplomové práce	prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2011
Datum odevzdání diplomové práce	13. 1. 2012
V Brně dne 31. 3. 2011	



prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

SVOBODA, P., DOLEŽAL, J., Průmyslové podlahy v objektech pozemních staveb, Bratislava JAGA GROUP 2007, ISBN 978-80-8073-054-0

DROCHYTKA, R : Lehké stavební hmoty, VUT FAST Brno

SVOBODA, L. a kolektiv, Stavební hmoty, JAGA GROUP, s.r.o. Bratislava 2005, ISBN 80-8076-007-1

PYTLÍK, P., Vlastnosti a užití stavebních výrobků, VUT IUM Brno 1998, ISBN 80-214-1123-6

PYTLÍK, P., Technologie betonu, VUT IUM Brno 2000, ISBN 80-214-1647-5

Příslušné normy

Články v odborných časopisech

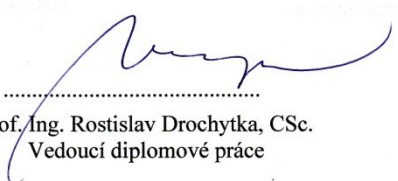
Zásady pro vypracování

Diplomová práce se bude zabývat možnostmi vylehčení průmyslových podlah (např. sklady, haly apod.) s alternativním použitím i v občanské výstavbě. Jak odlehčení, tak zlepšení izolačních vlastností lze dosáhnout pomocí vylehčení podlahové konstrukce. Práce bude zaměřena na využití klasických i alternativních lehčených kameniv v návrhu receptur pro podlahové konstrukce. Zároveň bude kladen důraz na využití druhotných surovin a různých odpadů ke zlepšení vlastností a zvýšení ekonomické výhodnosti.

1. V teoretické části provedte rešerši stávajícího stavu na trhu u nás i ve světě, druhů podlahových systémů, použití různých druhů lehčených podlahových systémů, využívaných i alternativních druhů lehčeného kameniva, lehkých odpadů a odpadních surovin vůbec
2. Navrhněte a ověřte postup zkoušení odpadních surovin, kameniv a lehčených kameniv jako surovin pro výrobu lehčených podlahových systémů
3. Vypracujte koncept možností náhrady surovin odpadními surovinami
4. Navrhněte a experimentálně ověřte vlastnosti nových stavebních materiálů pro lehčené podlahové systémy
5. Proveďte ekonomické zhodnocení navržených stavebních materiálů

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací


prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Práce se zabývá možnostmi vylehčení podlahových systémů. Pro podlahové systémy je zde řešeno vylehčení potěrové hmoty. Potěrové hmoty jsou modifikovány lehčenými plnivy vyráběnými z odpadních látek, lehkými odpadními látkami a plnivy vyráběnými z látek přírodních. Zároveň jsou řešeny možnosti vylehčení cementové potěrové hmoty mikrosférickými plnivy separovanými z odpadního popílku.

ABSTRACT

The work deals with the possibilities of lightening of the flooring system. Flooring system is solved by lightening the material. The surface layer is modified by lightweight fillers made from the waste materials, lightweight waste materials and fillers made from natural substances. Simultaneously is this work dealing with options of lightening the surface layer by microspheric fillers of separated waste fly ash.

Klíčová slova:

Podlaha, potěr, lehčené kamenivo, druhotná surovina, mikrosféry, alkalická reakce kameniva.

Key words:

Flooring, surface layer, light-weight aggregate, waste material, microspheres, alkali-aggregate reaction.

Bibliografická citace VŠKP

KŘUPALA, Jiří. *Nové možnosti využití lehčených kameniv z druhotných surovin*. Brno, 2011. 118 s., 12 s. příloh. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem sepsal tuto diplomovou práci sám na základě rešerše dostupných literatur a odborných článků. Vyhodnocení zkoušek na potěrových hmotách a vybraných plnivech zde uváděných, včetně pořízení potřebných fotodokumentací, jsem prováděl osobně.

V Brně dne 12.01.2012


.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval prof. Ing. Rostislavu Drochytkoví, CSc. a Ing. Evě Tůmové za vedení a veškeré podněty během samotného zpracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Janě Stachové, Blance Bártové a Ing. Davidu Procházkovi za odbornou výpomoc s provedením potřebných zkoušek na potěrových hmotách. Také bych zde rád poděkoval Mgr. et Bc. Štěpánce Jankovské za podporu během psaní této diplomové práce.

Obsah

1 ÚVOD.....	1
I TEORETICKÁ ČÁST	2
2 PODLAHOVÉ SYSTÉMY	2
2.1 Skladba podlahových systémů	2
2.2 Požární bezpečnost	2
2.1 Potěrové hmoty	3
3 PLNIVA	8
3.1 Expandovaná plniva z přírodních surovin	8
3.2 Plniva z odpadních surovin	10
3.3 Lehčená plniva vyráběná z odpadních surovin.....	11
4 POJIVA A PŘÍMĚSI.....	16
4.1 Cement	16
4.2 Popílek.....	17
4.4 Mikromletý vápenec	19
4.5 Metakaolin	19
4.6 Mikrosilika	20
4.7 Struska	20
5 NÁVRH KOMPONENTŮ VYVÍJENÉ POTĚROVÉ SMĚSI.....	22
5.1 Plniva.....	22
5.2 Cement	23
5.3 Popílek.....	23
5.4 Mikrosilika	24
5.5 Návrh skladby	25
5.6 Alkáliové rozpínání.....	29
II PRAKTICKÁ ČÁST	31

6 CÍL PRÁCE.....	31
7 METODIKA PRÁCE	32
8 ZKUŠEBNÍ POSTUPY	41
8.1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Stanovení zrnitosti síťovým rozborem (ČSN EN 933-1)	41
8.2 Stanovení sypané hmotnosti volně sypaného plniva, setřeseného kameniva a stanovení mezerovitosti (ČSN EN 1097-3).....	41
8.3 Objemová hmotnost zrn a nasákavosti (ČSN EN 1097-6)	42
8.4 Výroba a ošetření zkušebních těles (ČSN EN 13892-1).....	43
8.5 Stanovení povrchové tvrdosti a objemové hmotnosti (ČSN EN 13892-6)	43
8.6 Stanovení součinitele tepelné vodivosti (ČSN EN 933-14)	44
8.7 Stanovení pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu (ČSN EN 13892-6).....	44
8.8 Odolnost proti obrušování metodou Böhme (ČSN EN 13892-3).....	45
9 VALIDACE VLASTNOSTÍ KOMERČNÍCH SMĚSÍ S DATY V TECHNICKÝCH LISTECH	47
9.1 Vlastnosti srovnávacích směsí.....	47
9.2 Síťový rozbor komerčních směsí.....	48
9.3 Stanovení objemové hmotnosti	51
9.4 Stanovení mikrotvrdosti povrchu.....	52
9.5 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku	52
9.6 Stanovení konstruktivnosti komerčních hmot	54
9.7 Stanovení tepelné vodivosti komerčních hmot	54
10 VÝBĚR VHODNÝCH PLNIV	56
10.1 Lehčená plniva	56
10.2 Požadavky na lehčená plniva využitelná v potěrové hmotě.....	57
10.3 Výběr plniv	58
10.4 Zhodnocení výběru plniv.....	58

11 VLASTNOSTI PLNIV	59
11.1 Granulometrický rozbor	59
11.2 Základní fyzikálně-mechanické vlastnosti vybraných plniv	59
11.3 Difraktometrický rozbor plniv	60
12 VLIV LEHČENÝCH PLNIV NA VÝSLEDNÉ VLASTNOSTI POTĚROVÉ HMOTY	63
12.1 Vliv expandovaného perlitu na fyzikálně-mechanické vlastnosti potěrové hmoty.....	63
12.2 Vliv expandovaného vermikulitu a mikrosfér Q-CEL-7014, Omega-SPHERES W300 na fyzikálně-mechanické vlastnosti potěrové hmoty	66
13 NÁVRH SKLADBY CEMENTOVÉHO POTĚRU	73
14 ZKOUŠKY NA LEHČENÝCH POTĚROVÝCH HMOTÁCH.....	74
15 OPTIMALIZAČNÍ VÝPOČET	79
16 SHRUTÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	86
16.1 Etapa I – Návrh a metodika zkušebních těles	86
16.2 Etapa II – Zkoušky komerčních směsí.....	86
16.3 Etapa III – Výběr vhodných surovin	87
16.4 Etapa IV – Vliv množství lehčeného kameniva na výsledné vlastnosti hmoty	87
16.5 Etapa V – Návrh receptury	88
16.6 Etapa VI – Zkoušky na referenčních směších.....	89
16.7 Etapa VII – Zkoušky na modifikovaných tělesech	89
16.8 Etapa IV.....	90
17 DISKUZE	92
18 ZÁVĚR	98
Literatura	100
Uváděné technické předpisy	102
Seznam zkratk a symbolů.....	103

Seznam obrázků	104
Seznam tabulek	106
Seznam grafů.....	108
Příloha A: Granulometrie plniv	110
Příloha B: Receptury modifikovaných potěrových hmot	120

1 ÚVOD

Tato diplomová práce byla realizována za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím Ministerstva průmyslu a obchodu v rámci projektu FR-TI3/742 - Systém lehčených hmot pro dokončování staveb s druhotnými surovinami.

Využití odpadních látek ve stavebnictví může ve srovnání s deponováním odpadu ulehčit zátěži na životní prostředí. Druhotné suroviny lze využít ve formě samostatného materiálu, případně zakomponovat do stavebních hmot.

Při výběru vhodných surovin je nutné specifikovat základní požadované fyzikálně-mechanické vlastnosti. Dále je nutné ověřit vliv látky na životní prostředí, celkovou toxicitu látky a její vliv na lidský organismus během nakládání s látkou.

Druhotnými surovinami lze nahradit plniva ve stavebních hmotách. Plniva musí splňovat příslušné technické požadavky a zároveň je nutné vybírat pevné látky s požadovanou granulometrií, případně granulometrii pevné látky upravit. Úpravou druhotných surovin lze získat odlišné typy lehčených kameniv.

Lehčeným plnivem lze snížit objemovou hmotnost stavebních materiálů a zároveň docílit zlepšení akustických a tepelně-vodivostních parametrů stavebních materiálů. Výstavba v průmyslové výrobě je doprovázena problémy s šířením hluku z provozu strojních zařízení. Bytová výstavba klade vysoké požadavky na tepelně-izolační vlastnosti materiálů.

Využitím druhotných surovin lze vylehčit horizontální konstrukce stavby. Při výběru surovin pro přípravu cementových potěrových hmot je však nutné respektovat i požadavky na maximální zrno plniva a zároveň zaručit trvanlivost materiálu.

I TEORETICKÁ ČÁST

2 PODLAHOVÉ SYSTÉMY

Podlaha je součástí horizontální konstrukce stavebního díla. Její základní funkcí je přenos zatížení. Minimálním užitným zatížením 5 kN.m^{-2} a zároveň pojezdem zařízením o užitné hmotnosti vyšší nebo rovné 10 kN je rozlišena průmyslová podlaha od podlah občanské výstavby. Na jednotlivé druhy podlah jsou kladeny požadavky především z pohledu na typ výstavby. Mezi sledované vlastnosti patří kročejová neprůzvučnost, pokles dotykové teploty, požární odolnost, odolnost proti obrušování i řada dalších.

Výchozí normou pro podlahové systémy je ČSN 74 4505 „*Podlahy – společná ustanovení*“. Pojem podlahové systémy shrnuje jednotlivé typy izolačních a nášlapných hmot a materiálů využívaných v průmyslové i bytové výstavbě.

2.1 Skladba podlahových systémů

Součástí podlahových systémů může být vodotěsná, parotěsná, kročejová nebo tepelná izolace, případně izolace proti vibracím a otřesům.

Skladba podlahoviny obsahující izolaci:

- podkladní vrstvy podlah pod izolace
- vlastní izolace
- pochůzná vrstvy

Podkladní vrstvy mohou být prováděny suchým i mokřím způsobem. Na podkladní vrstvu je aplikována izolační vrstva. Následuje vrstva nášlapné povrchové úpravy [1].

2.2 Požární bezpečnost

Základní pojmy z oblasti požární bezpečnosti uvádí ČSN EN ISO 13943 „*Požární bezpečnost – Slovník*“. Jedním ze základních faktorů při hodnocení požární odolnosti

konstrukce je nosnost konstrukce namáhané mechanickým zatížením za současného působení požáru.

Dle ČSN 73 0823 „*Požárně technické vlastnosti hmot. Stupeň hořlavosti stavebních hmot*“ rozdělujeme stavební hmoty do tříd hořlavosti uvedených v tabulce 1.

Tabulka 1: Třídy hořlavosti stavebních hmot dle tříd reakcí na oheň [2].

Stupeň hořlavosti	Význam	Třída reakce na oheň
A	nehořlavé	A1
B	nesnadno hořlavé	A2
C1	těžce hořlavé	B
C2	středně hořlavé	C nebo D
C3	lehce hořlavé	D nebo F

Klasifikace do jednotlivých tříd hořlavosti bývá prováděna na základě předpisu ČSN EN 13501-1 „*Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb - Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň*“ Reakce na oheň je sledována především s ohledem na vzrůst teploty, úbytek hmotnosti, plamenné období, spalné teplo, rychlost rozvoje požáru, celkové uvolňování tepla, postranní šíření plamene, rychlost vývinu kouře, celkovou tvorbu kouře a šíření plamene [2].

2.1 Potěrové hmoty

Potěrové hmoty řadíme společně s mazaninami, stěrkami a druhotně lehčenými betony do skupiny podkladních vrstev podlah.

Obecné pojmy z oblasti potěrových hmot jsou předmětem normy ČSN EN 13318 „*Potěrové materiály a podlahové potěry – Definice*“. Jednotlivé požadavky a celkové vlastnosti lze nalézt v normě ČSN EN 13813 „*Potěrové materiály a podlahové potěry – Potěrové materiály – Vlastnosti a požadavky*“. Důležitými faktory při výběru potěrové hmoty jsou maximální síla vrstvy potěru, jeho zrnitost, vliv plniv i aditiv, jakožto i doba tuhnutí a zrání, přilnavost k povrchu, objemová stálost a především pevnostní charakteristiky. Pro řešení pevnostních tříd potěrových hmot jsou vhodné zkoušky pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku odpovídající příslušné normě ČSN EN 13892-2 „*Zkušební metody potěrových materiálů – Část 2: Stanovení pevnosti v tahu za*

ohybu a pevnosti v tlaku“. Zkoumány jsou zároveň hmotnostní a vodivostní charakteristiky. Pro potěrové hmoty je také vhodné provést zkoušky obrusnosti.

Rozdělení potěrů dle pojivové báze:

- cementový potěr
- anhydritový potěr a potěry na bázi síranu vápenatého
- asfaltové potěry
- hořečnaté potěry
- potěry na bázi syntetických pryskyřic

Anhydritové potěry lze provádět v malých tloušťkách bez nutnosti dodatečně vyrovnávat povrch podlahy. Potěry na bázi síranu vápenatého jsou však oproti cementovým potěrům výrazně náchylné k poklesu pevnostních charakteristik v kontaktu se zvýšenou vlhkostí (Tab. 2). Z ekonomického hlediska jsou cenově výhodnější potěry cementové, je však nutné brát v potaz větší smrštění hmoty a dále nutnost 2-3 denního ošetřování. Asfaltových potěrů lze využít především pro zvýšení požární odolnosti konstrukce [3].

Tabulka 2: Požadavky na vlhkost potěrů při pokládce dle ČSN EN 74 4505.

Nášlapná vrstva	Cementový potěr	Potěr na bázi síranu vápenatého
Plná nebo keramická dlažba	5,00%	5%
Syntetické lité podlahoviny	5,00%	nelze provádět
Paropropustné textilie	4,00%	0,50%
PVC, linoleum, guma, korek	3,50%	0,50%
Dřevěné podlahy, laminátové podlahy	2,50%	0,50%

Rozdělení cementových potěrů dle plniv

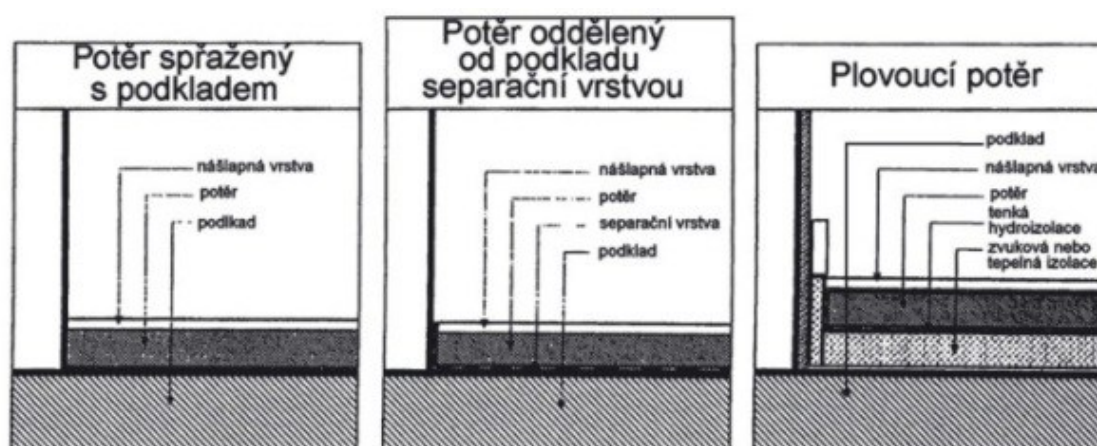
- potěr pískocementový
- potěr popílkocementový
- potěr perlitocementový

Rozdělení potěrů dle konzistence

- zavlhlý potěr
- litý potěr

Lité potěry dnes zastupuje celá škála jemnozrnných směsí s pojivy na bázi síranu vápenatého. Zavhlhlými potěry se uvažují především hmoty s cementovou pojivovou bází a jemnozrnnými plnivy. Zavhlhlé potěry je nutné hutnit vzhledem k jejich konzistenčním vlastnostem. Při hutnění plovoucích potěrů je však nutno brát v úvahu tlumící efekt podkladní izolace ovlivňující konečné zmonolitnění prvku [4].

Využitím vhodných příměsí a silně ztekucujících přísad lze připravit tzv. litý samonivelační potěr [2].



Obrázek 1: Rozdělení potěrů dle typu funkce [3].

Rozdělení potěrů dle typu konstrukce

- potěr spřažený s podkladem
- potěr na oddělovací mezivrstvě
- plovoucí potěr

Spřažený potěr s maximální tloušťkou 60 mm (obvykle 10 – 30 mm) se používá především pro dosažení požadované kvality povrchu při betonáži. Naopak potěr oddělený separační vrstvou bývá využit především při vyrovnání nerovností stropních konstrukcí, a to v minimální vlastní tloušťce 35 mm a v maximu vlastní tloušťky 50 mm, udávají se však i hodnoty 20-40 mm. Plovoucí potěr přibližné tloušťky 40 mm je vhodný pro překrytí tepelné izolace, nesouvisí však nijak s ostatními konstrukcemi a je samostatně pohyblivý (Obr. 1) [3, 5].

Rozdělení potěrů dle uplatnění

- potěry pro bytovou výstavbu
- potěry pro průmyslovou výstavbu

Vysoké nároky na potěrové hmoty jsou kladeny především v oblasti průmyslové výstavby. Mimo základních pevnostních charakteristiky je ověřována odolnost proti obrušování metodou Böhme dle ČSN EN 13892-3 „Zkušební metody potěrových materiálů - Část 3: Stanovení odolnosti proti obrušování metodou Böhme“ a odolnost proti obrušování metodou BCA dle ČSN EN 13892-4 „Metody zkoušení potěrových materiálů - Část 4: Stanovení obrušivosti přístrojem BCA“, dále odolnost proti valivému zatížení dle ČSN EN 13892-5 „Zkušební metody potěrových materiálů - Část 5: Stanovení odolnosti potěrů, sloužících jako užitková vrstva, proti opotřebení valivým zatížením“, případně ČSN EN 13892-7 „Zkušební metody potěrových materiálů - Část 7: Stanovení odolnosti potěrů s podlahovou krytinou proti opotřebení valivým zatížením“ a pevnost povrchu dle ČSN EN 13892-6 „Zkušební metody potěrových materiálů - Část 6: Stanovení tvrdosti povrchu“.

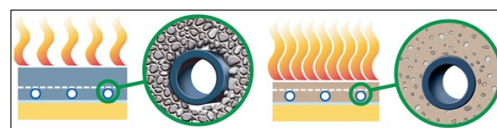
Dělení potěrů dle využitelnosti otopných systémů

- vyrovnávací potěr
- vytápěcí potěr

Využitím cementových potěrů může docházet k špatnému přenosu tepla mezi otopným tělesem a potěrovou hmotou (Obr. 2).

Problém zvýšené pórovitosti cementového tmele včetně problému vzniku hluchých míst

v oblastech styku s otopným tělesem lze řešit plastifikačními přísadami. V oblasti podlahových topení je vhodné využívat potěrů anhydritových [URL 1].



Obrázek 2: Odlišnosti vytápěcích anhydritových a cementových potěrů [URL 1]

Cementové potěry

Na rozdíl od klasického betonu cementové potěry neobsahují hrubou frakci plniva. Oproti tomu se také uvádí omezení maximální tloušťky potěru, a to přesněji maximálním zrnem 4 mm při tloušťce potěru do 40 mm a maximálním zrnem plniva 8 mm celkově při vyšší tloušťce potěru [5].

Cementové potěry lze zhotovovat nejen jako vyrovnávací podklad pod izolační vrstvu, ale i jako ochrannou vrstvu nad samotnou izolací, případně je lze využít ke klasickému vyrovnávání povrchu [1].

Vzhledem k vývoji kompozitů nové generace se jeví jako příznivé vylepšovat vlastnosti cementových potěrů přidávkem vláken snižujících efekt objemových změn a zároveň zvyšujících kvalitativní vlastnosti vzniklého kompozitu. Vhodné jsou především vlákna polypropylenová, a to v rozmezí dávky 0,8 až 1,1 kg na m³ směsi. Nesmí se však opomíjet i jednotlivá aditiva, a to především plastifikační přísady [5].

Zatřídění cementových potěrů probíhá dle jejich pevnostních charakteristik informativně uvedených v tabulkách 3 až 6.

Lehčené cementové potěry

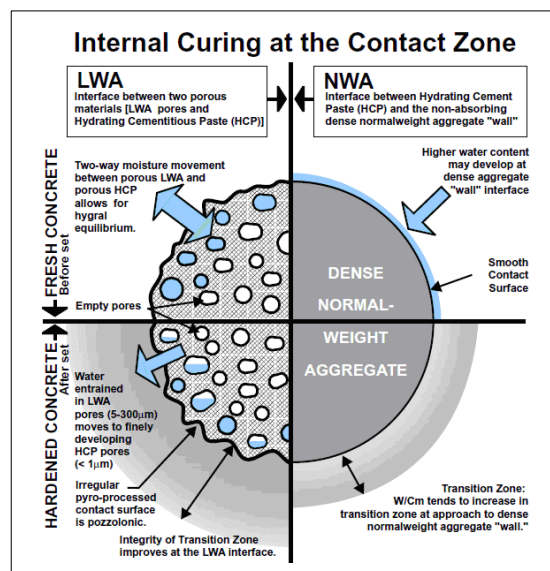
Využitím nepřímého vylehčení lze vylepšit teplotní i akustické vlastnosti potěrových materiálů vhodných pro aplikace do občanské výstavby. Zkoumán je především součinitel tepelné vodivosti kompozitu a jeho akusticky-izolační schopnosti z hlediska vzduchové a kročejové neprůzvučnosti dle normy ČSN 730532 „Akustika - Ochrana proti hluku v budovách a posuzování akustických vlastností stavebních výrobků – Požadavky“.

Efekt samoošetřování

Předvlhčením řady pórovitých plniv předcházíme hydratačním problémům a lze uvažovat i o podpoření samotné hydratace, a to vzhledem k přístupu hydratačních látek k vodě obsažené v pórovém systému plniva (Obr. 3) [5].

Efekt samovakuování

Lehčená plniva mohou obsahovat otevřený pórovitý systém schopný okamžitě nasáknout velké množství tekutin a tím odebrat cementové směsi potřebnou záměsovou vodu. Tento problém lze řešit předvlhčením pórovitých plniv těsně před aplikací do vytvářené směsi. Upravené plnivo by mělo být pouze povrchově nasáklé, a to tak, aby neodebíralo směsi záměsovou vodu a zároveň nevytvářelo její nadbytek.



Obrázek 3: Efekt samoošetřování [URL 2].

3 PLNIVA

V silikátových kompozitech tvoří plnivo kostru materiálu. Při výběru plniva uvažujeme především jeho fyzikálně-mechanické vlastnosti vzhledem k jeho užití. Nemalou roli však hraje i chemické složení ovlivňující vlastnosti výsledné hmoty. Plnivo do betonu musí vyhovovat normě ČSN EN 12620 „*Kamenivo do betonu*“. Lehčené plnivo musí vyhovovat požadavkům normy ČSN EN 13055-1 „*Pórovité kamenivo - Část 1: Pórovité kamenivo do betonu, malty a injektážní malty*“.

3.1 Expandovaná plniva z přírodních surovin

Přírodní suroviny schopné expanze za zvýšené teploty je možné přetvářet na zrnitá plniva nízkých objemových hmotností.

Expandované slídy

Expandovaný vermikulit vzniká procesem exfoliace za zvýšené teploty. Tepelným přechodem mezivrstvé krystalické vody za teploty 1100 °C na vodní páru dochází v jílovém minerálu k lokálním expanzím a následnému oddělování okolních laminárních vrstev [URL 3].



Obrázek 4: Vermikulit Medium (foto autor).

Béžově zbarvený expandovaný vermikulit dosahuje sypné hmotnosti od 80 do 130 kg.m⁻³ dle požadované frakce (Obr. 4). Bod tání vermikulitu je určen na 1250 °C, součinitel tepelné vodivosti na 0,065 W.m⁻¹.K⁻¹ a hodnota pH na 8,5 až 10 [URL 3].

Ve stavebnictví nalézá expandovaný vermikulit využití pro lehčené a tepelně izolační malty a betony o objemové hmotnosti od 350 kg.m⁻³ [6].

Expandovaná vulkanická skla

Kyselé vulkanické sklo perlit obsahuje 2-5 % vázané vody, kterou je možné zahřátím za teplot 900 až 1300 °C uvolnit za přítomného nadýmání suroviny a současně zvětšení objemu 5 až 10 krát. Expandovaný amorfni křemičitan hlinitý má teplotu tání 980 až 1260 °C a je využitelný do teplot 900 °C. Šedobílé plnivo (Obr. 5)

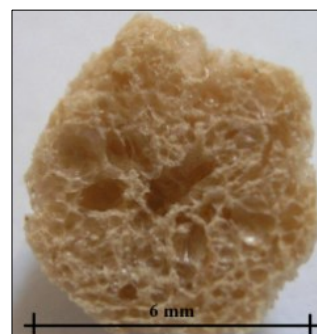


Obrázek 5: Expandovaný perlit EP 180 (foto autor).

vykazuje vynikající sorpční vlastnosti, hodnota pH je udávána na 7,1 [6, URL 4].

Expandovaný křemičitý písek

Porézní materiál SioPor je vyráběn expandací speciálního druhu křemičitého písku. Na trhu dostupné plnivo vykazuje sypanou hmotnost 60 až 80 kg.m⁻³ a součinitel tepelné vodivosti 0,042 až 0,044 W.m⁻¹.K⁻¹(Obr. 6). Beton připravený z napěněného plniva SioPor dosahuje objemové hmotnosti 220 až 600 kg.m⁻³ o součiniteli tepelné vodivosti 0,08 až 0,13 W.m⁻¹.K⁻¹.



Obrázek 6: Plnivo SioPor, řez [URL 5].

S využitím cementového pojiva pevnostní třídy 32,5 MPa v množství 300 kg. m⁻³ dosahuje beton připravený ze SioPoru pevnosti v tlaku do 1,5 MPa. Bod měknutí materiálu SioPor je udáván na 700 °C [URL 5].

Expandované jíly

Lehčené plnivo Liapor z expandovaných jílu je na trhu dostupné v podobě oválných až kulovitých zrn (Obr. 7), případně drcené. Frakce kulových zrn se pohybují v rozmezí 0 až 16 mm, přičemž sypaná hmotnost frakce 0 - 4 mm se pohybuje v rozmezí 450 až 625 kg.m⁻³. Liapor je plnivo nasákové,



Obrázek 7: Kamenivo Liapor 1/4 mm (foto autor).

nasákavost určená hmotnostně po 30-ti minutách je 3-4 %. Součinitel tepelné vodivosti frakce 0 - 4 mm činí $0,11 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Plnivo je využitelné do teplot $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [URL 6].

3.2 Plniva z odpadních surovin

Odpadní suroviny mohou nalézt využití v podobě lehčených i nelehčených plniv do stavebních kompozitů. U lehčených plniv organického původu je nutné brát zřetel na požární bezpečnost.

Abrázivní materiál AMT

V průběhu spalování černouhelného prachu ve výtavných ohništích elektráren vzniká odpadní struska. Po prudkém ochlazení strusky vodou a následném drcení a třídění získáváme sklovitý materiál s obsahem volných bublinek po plynech. Z uhelné pecní strusky elektrárny Třebovice je vyráběn zelenohnědý abrazivní materiál (Obr. 8) o tvrdosti 6 až 8. Mineralogicky je složen z 99 % oxidického silikátového skla, přičemž SiO_2 ve volné formě je obsaženo pouze stopově.



Obrázek 8: Struska AMT 0-2 mm (foto autor).

Abrázivní materiál AMT dosahuje sypané hmotnosti 1320 kg.m^{-3} a je dostupný v zrnitosti 0,2 až 1,6 mm vhodný pro aplikace do cementových směsí.

Odpadní lupek

Lupek (Obr. 9) vznikající jako úletový materiál při úpravě a výpalu lupků a kaolinů. Při výpalu lupku v rotační peci jsou hrubé úlety zachycovány cyklóny a jemné úlety zachycované tkaninovými filtry. Firma České lupkové závody a.s. dodávají lupky v základních zrnitostech 0-30; 5-30; 3-5; 0-3 mm, tak i jemně tříděné na zrnění



Obrázek 9: Lupek [URL 10]

0-0,1; 0-0,2; 0-0,5; 0,5-1; 0-1; 1-3; 3-5 mm.

Z mineralogického hlediska se jedná především o mullit, v menší míře pak o cristobalit a křemen.

3.3 Lehčená plniva vyráběná z odpadních surovin

Nejen přírodní, ale i odpadní suroviny je možné za specifických podmínek přetvořit na lehčené zrnité hmoty vyhovující požadavkům na plnivo do betonu.

Kamenivo vyráběné „studenou cestou“ - Rugen

Nízká energetická náročnost výroby je specifická pro kamenivo Rugen (Obr. 10). Základní surovinou pro výrobu kameniva Rugen jsou jemné anorganické odpadní materiály (JAOM) vznikajících v energetickém průmyslu a při zpracování stavebních surovin. Surovinovou vsázkou bývá obvykle 60 až 100 % JAOM. Nedílnou součástí směsi pro výrobu kameniva Rugen jsou mimo vedlejší energetické produkty (VEP) také vzdušná a hydraulická pojiva (vápenný hydrát a cementy), příměsi, přísady a voda. Dle vstupních surovin lze u kameniva Rugen dosáhnout sypané hmotnosti 500 až 1200 kg.m⁻³ při pevnostech 0,5 až 3,5 MPa. Dodáváno je jak ve formě kulových, tak ve formě nepravidelných zrn [6].

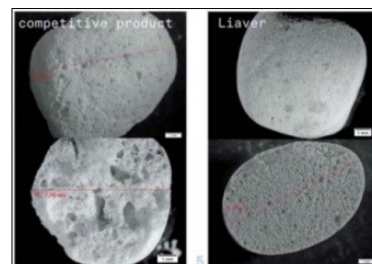


Obrázek 10: Kamenivo Rugen RU [6]

Kamenivo Rugen RU vyhovuje ČSN EN 13055-1: „Pórovité kamenivo – Část 1: Pórovité kamenivo do betonu, malty a injektážní malty“ [8].

Kamenivo z expandovaného skelného odpadu - Liaver

Pod obchodní značkou Liaver nalézáme anorganické tepelně expandované sklo založené na obalovém recyklovaném skle. Expandace probíhá za teplot 750 až 900 °C za vzniku uzavřených lehčených zrn světle šedé až šedé barvy (Obr. 11). Hodnota pH činí 7, sypaná



Obrázek 11: Plnivo Liaver [URL 6].

hmotnost 200 až 500 kg.m⁻³ a součinitel tepelné vodivosti činí u kameniva Liaver 0,07 W.m⁻¹.K⁻¹ [URL 6].

Granulát z expandovaného tříděného skelného odpadu Poraver

Poraver je krémově bílé porézní plnivo (Obr. 12) hodnoty pH 9 až 12 s pevností udávanou na 0,5 až 6,5 N.mm⁻². Vyrábí se z recyklovaného skla a zejména ze střepů nevyužitelných pro výrobu láhví. Poraver dosahuje vysoké tepelné odolnosti 700 °C.



Obrázek 12: Plnivo Poraver [URL 12].

Lehčené plnivo vyrábí firma Dennert Poraver GmbH v různé zrnitosti od 0,04 mm do 16 mm. Objemová hmotnost Poraveru se dle zrnitosti pohybuje v rozmezí 140 až 400 kg.m⁻³. Sypná hmotnost Poraveru je v rozmezí 410 až 850 kg.m⁻³.

Plnivo z expandovaného skelného odpadu a skelná moučka - Refaglass

Plnivo Refaglass vyrábí společnost RECIFA a.s. z odpadních střepů obalového skla. Expandací recyklovaného skla vzniká řada uzavřených buněk zaručujících nulovou nasákavost plniva a zároveň nízkou objemovou hmotnost a vysoké tepelné izolační vlastnosti za přijatelných



Obrázek 13: Expandovaný skelný odpad Refaglass [URL 7].

pevnostních charakteristik. Sypná

hmotnost šedě zbarveného plniva Refaglass činí 150 až 180 kg.m⁻³ (Obr. 13). Dodáván je v zrnitosti 30 až 60 mm o pevnostech 0,64 až 1,3 MPa. Součinitel tepelné vodivosti je 0,075 W.m⁻¹.K⁻¹. Vysoká teplotní odolnost je dána bodem měknutí nad 700 °C. V současnosti slouží plnivo Refaglass především jako zásypový lehčený materiál s výbornými tepelně izolačními vlastnostmi. Jeho možné úpravy a celkovou využitelnost v podobě plniva v cementových kompozitech je nutné prokázat, a to především vzhledem ke vzniku alkalicko-křemičité reakce [URL 7].

Lze využít i skelné moučky Refaglass, a to především s ohledem na možné pucolánové vlastnosti skelného filleru. Během výroby jsou různobarevné střepy z obalového skla semlety v kulovém mlýnu na frakci pod 90 μm a následně převedeny na rotační síto a odstředěním zbaveny nečistot. Samotná moučka je mezistupněm při výrobě pěnového skla [9, URL 7].

Plnivo z expandovaného skelného odpadu - Geocell

Dalším výrazným produktem vyráběným z odpadního skla a zároveň dostupným na českém trhu je sklopěnový recyklát Geocell (Obr. 14). Jedná se o nenasákavý, vodě propustný materiál. Uzavřené buňky materiálu Geocell byly vytvořeny úmyslným pnutím. Sklopěnový recyklát dosahuje objemové hmotnosti 150 kg.m^{-3} a dodáván je v zrnitosti 10 až 60 mm. Součinitel tepelné vodivosti je udáván na 0,08 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Plnivo Geocell je dle technického listu dlouhodobě odolné proti alkáliím [URL 8].



Obrázek 14: Expandovaný skelný odpad Geocell – drť (foto autor).

Lehčená struska

Pro zpěněnou strusku (Obr. 15) vyráběnou z kyselé struskové suroviny je především vhodná mikropórovitost, tj. rozhodující je především velikost otevřených pórů. Velké otevřené póry odebírají směsi cement. Tímto způsobem se i přes jejich sníženou objemovou hmotnost zvyšuje výsledná objemová hmotnost materiálu (otevřená pórovitost se zaplní cementovým tmelem). Zároveň se snižuje i pevnost materiálu.



Obrázek 15: Lehčená struska [URL 9].

Mikrosféry

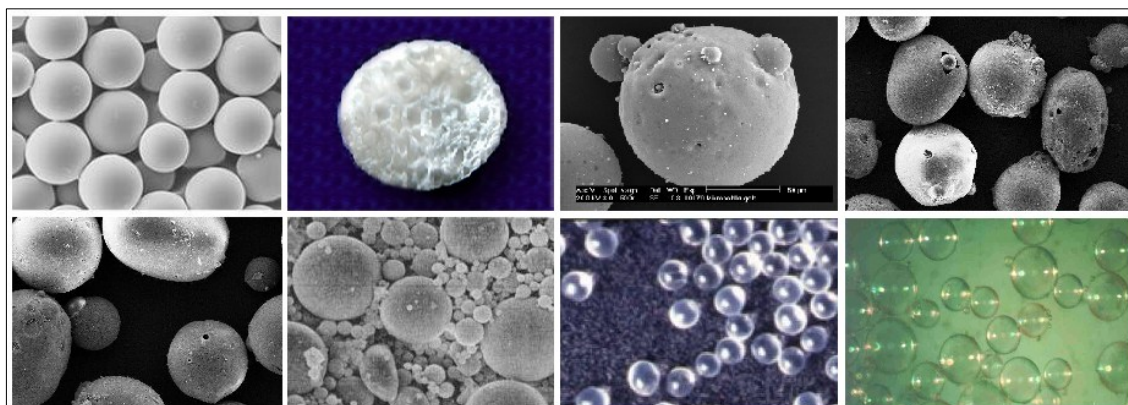
Plavený popílek je separovaný křemičitý materiál kulového tvaru o nízké objemové hmotnosti s uzavřenou pórovitostí či zcela dutý. Na trhu jsou plavené popílkky uváděny

pod názvem mikrosféry, které dále dělíme na cenosféry a plerosféry. Cenosféry nalézají využití v podobě vylehčujícího a často i multifunkčního plniva různých zpracovatelských odvětvích. Hlavními kvalitativními přínosy pro použití cenosfér ve stavitelství jsou jejich hmotnostní, tepelně i zvukově izolační vlastnosti a dále zvýšení žáruvzdornosti prvku. Plavený popílek je nízkoreaktivní a lze jej považovat za inertní surovinu vzhledem k alkalicko-křemičité reakci. Z mineralogického hlediska se jedná o amorfni oxid křemičitý vykazující pucolánovou aktivitu [URL 9, 11].

Tabulka 3: Cenosféry [URL 11].

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Sypná hmotnost volně sypané	350 – 450	[kg.m ⁻³]
Měrná hmotnost	450 – 750	[kg.m ⁻³]

V ČR vystupuje na trhu s plaveným popílkem firmy *Jet Company, s.r.o.* s výrobkem Cenosféry (Tab. 3), jedná se o základní plavený popílek. V zahraničí se setkáváme s plaveným popílkem Fillite firmy *Omya CZ s.r.o.* i s různými jinými dodavateli cenosfér. Významným dodavatelem je firma *Omega Minerals* vystupující na trhu s pestrou škálou mikrosfér (Obr. 17). Produkt E-Spheres SL nalézají mnoha využití a dosahuje vysoké teplotní i mechanické stability, dodáván je čistě bílý, částečně průhledný. Výrobek Omega Bubbles má oproti ostatním mnohobuněčnou strukturu a značnou velikost zrn 0,04 až 4 mm. Cenově přijatelný je lehčený filler Isospheres velikosti zrna 110 až 310 µm a funkční filler Omega-Sil velikosti zrna 1 až 90 µm. V nabídce je multifunkční fillery Q-Cel a Spherichel či lehčené fillery Omega Spheres s velikostí zrna 60 až 550 µm a Omega Spheres W s velikostí zrna 60 až 230 µm [URL 9, URL 10, URL 11].



Obrázek 16: Mikrosféry firmy Omega (postupně z leva do prava: E-Spheres SL, Omega Bubbles, IsoSpheres, Omega Spheres, Omega Spheres W, Omega-Sil, Q-Cel, Spherichel; [URL 11, kompozice autor]).

Tržní cena mikrosfér se pohybuje v rozmezí 11 000 až 38 000 Kč.t⁻¹ [15].

4 POJIVA A PŘÍMĚSI

Pojiva ve stavebních kompozitech s cementovou matricí tvoří složku mezi jednotlivými zrny plniva, přenášející na zrna vyvolaná vnější napětí. V případně horší zrnitosti vstupu se pojiva podílí na vyplnění mezer v kompozitu. Cementovým pojivem rozumíme pojivo s vysokým obsahem slínekových minerálů, případně jiných složek schopných tvořit obdobné sloučeniny.

Příměsi v silikátových kompozitech zlepšují vlastnosti během zpracování i vlastnosti konečné. S rostoucím měrným povrchem dochází ke zvyšování aktivity jak pucolánových, tak latentně hydraulických příměsí, ovšem na úkor energetické náročnosti zdobňovacích procesů. S vyšším měrným povrchem je však nutné počítat i s vyšší spotřebou záměsové vody, a to vzhledem k přístupu hydratační vody k hydrataci schopným složkám směsi.

Obecně příměsi zlepšují reologické vlastnosti směsi, a to především její zpracovatelnost a celkovou soudržnost. Nemalý vliv mají příměsi i na segregaci částic během zpracování a zároveň na postupný bleeding. V konečném stádiu fungují aktivní příměsi jako utěšňující složky, při vyšších množstvích je však nutné počítat i s větším smrštěním během zrání betonu.

4.1 Cement

Při tvorbě kompozitu lze využít různých druhů pojivové báze. Mezi zástupce hydraulicky reagujících látek patří cement. Základní složkou cementu je slínek, dále obsahuje přísady přidávané během mletí slínku.

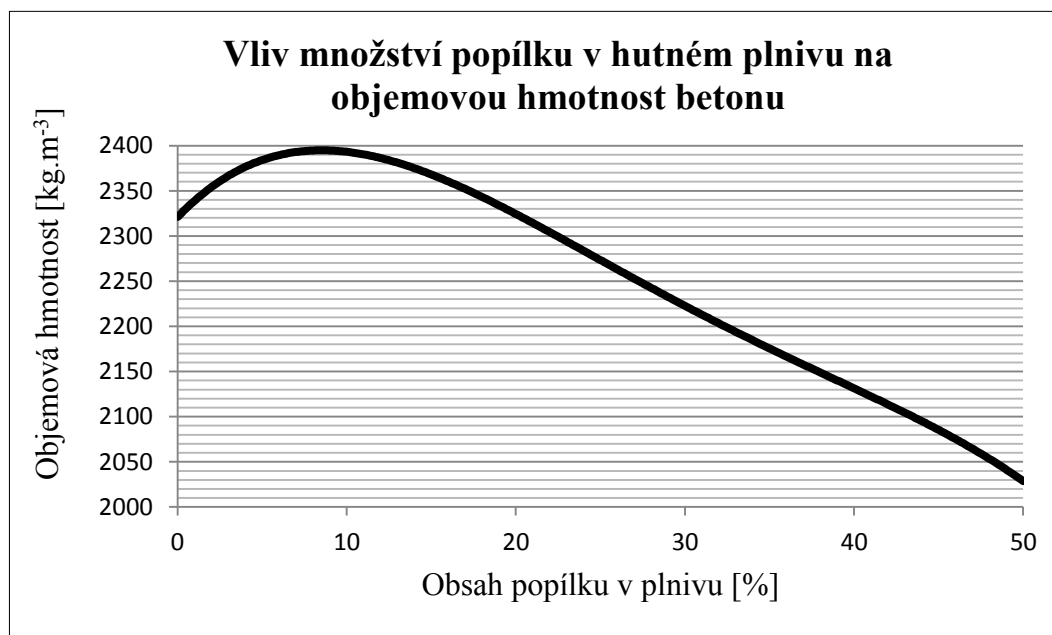
Portlandský slínek je vypalován z předem namíchané suroviny s převažujícími obsahy oxidů CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 . Vypálením slínku se stává hydraulickou látkou s převládajícím obsahem křemičitanů vápenatých, nejméně však z dvou třetin hmotnostního obsahu.

4.2 Popílek

Při spalování tuhých paliv v jemně mletém stavu vzniká mimo škváru i odpad ve formě plných či dutých kuliček křemičitého skla o nízké objemové hmotnosti. Jedná se o VEP. Kulovitá zrna o průměru 0,001 až 0,1 mm a specifického povrchu dle Blaina 200 až 300 m².kg⁻¹ vznikají ztuhnutím taveniny během spalovacích procesů. Rozeznáváme několik druhů popílků. Jde především o popílky vzniklé klasickým způsobem z vysokoteplotního spalování paliv a o popílky ze spalování fluidního.

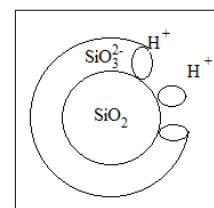
Využití popílku jako náhrady silikátové pojivové složky je možná pouze do 50 % z hmotnosti slínku, dále se již popílek uplatňuje ve formě mikroplniva. Maximální množství aktivního popílku je dáno hmotnostním podílem popílku a cementu rovným či nižším než 0,33. V ČR se setkáváme především s hnědouhelným popínkem nepravidelného tvaru zrn a spotřebou 18 až 20 % vápenatého iniciátoru. Překročení 20% hranice přídatku vápenatého iniciátoru zvyšuje nebezpečí rozpadu zatvrdlého kompozitu. Hlavní výhodou v menší míře vznikajícího černouhelného popílku je mimo specifické složení také granulometrie kulových zrn [11, 12].

Popílek částečně snižuje objemovou hmotnost hmoty (Graf 1) a v prvních fázích zrání zpomaluje tvrdnutí a tuhnutí cementové směsi.

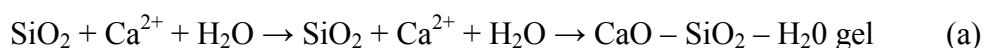


Graf 1: Vliv množství popílku v hutném plnivu na objemovou hmotnost betonu [10].

Vzhledem k mineralogickému složení vykazují popeloviny pucolanitu, tj. schopnost amorfního oxidu křemičitého vytvářet reakcí s vodou za přítomnosti vápníku z přítomného hydroxidu vápenatého hydratované křemičitany vápenaté. Pucolanita popílku je závislá především na měrném povrchu suroviny a zároveň na vysokém obsahu amorfního oxidu křemičitého (Obr. 17, rovnice a).



Obrázek 17:
Reakce amorfního
SiO₂ [13].



Technogenní popílkový pucolán se v silikátových kompozitech reakčně projevuje až 28. dnem zrání, přičemž zvyšování pevnosti probíhá nadále i po 90 dnech zrání. Objemová hmotnost volně sypaného popílku se pohybuje v rozmezí 550 až 900 kg.m⁻³. Z mineralogického hlediska se jedná především o křemen a mullit, v menším obsahu jiné minerály a nespálené složky.

Vysokoteplotní popílek

Vysokoteplotní spalování probíhá za teplot 1200 až 1700 °C, vzniká popílek s vysokým obsahem oxidu křemičitého a mullitu, přičemž obsah sklovité fáze neklesá pod 50 %. Rozeznáváme dva typy popílku z vysokoteplotního spalování, a to na základě součtu oxidů křemíku, hliníku a železa, tj. zbytkovým obsahem oxidu vápníku. Suma kvalitativních oxidů hodnot 50 % je typická pro popílky typu C vzniklé spalováním méně kvalitního hnědého uhlí a především lignitu. Popílek typu C obsahuje až 20 % volného oxidu vápníku. Naopak vysokoteplotním spalováním kvalitního černého uhlí, případně antracitu, vzniká popílek typu F s obsahem kvalitativních oxidů 70 % a s obsahem volného oxidu vápníku do 3 % [14].

Fluidní popílek

Fluidní popílek vzniká spalováním méně kvalitních paliv společně s vápencem, případně dolomitem při teplotě 850 °C v cirkulující vrstvě, kde se přítomné oxidy síry váží na přítomný vápník za vzniku bezvodého síranu vápenatého, čímž dochází k odsiřování vzniklých spalin. Popílek z fluidního spalování tudíž obsahuje mimo křemičité složky a zbytky spalin i anhydrit, bezvodý síran vápenatý, volný oxid vápníku, případně uhličitany vápenaté, avšak neobsahuje mullit. Rozeznáváme dva základní druhy fluidního popílku, a to popílek ložový a popílek z odlučovačů. Popílek z odlučovačů lze dále dělit na hrubý popílek z mechanických odlučovačů (cyklóny) o

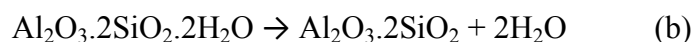
sypné hmotnosti 900 až 1200 kg.m⁻³ a jemný popílek z elektrofiltrů, případně filtrů tkaninových o objemové hmotnosti 800 kg.m⁻³. Fluidní popílek s až 20 % obsahem siřičitanů, až 15% obsahem volného CaO a až 15% ztrátou žíháním není vhodný pro výrobu silikátových směsí vzhledem k vysokým obsahům cizorodých látek [12, 14].

4.4 Mikromletý vápenec

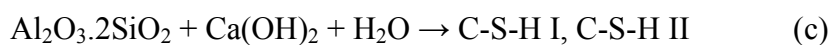
Drcením a mletím vápence vzniká vápenné mikroplnivo urychlující hydrataci trikalciumpsilikátu. Urychlením hydratace C₃S lze dosáhnout rychlejšího vývoje počátečních pevností betonu. Reakce je závislá především na měrném povrchu. Obecný požadavek uvádí min. 70% propad mikromletého vápence sítem 0,063 mm při zkoušce zrnitosti [5].

4.5 Metakaolin

Metakaolin je hlavním výrobním produktem. Vysoce reaktivní metakaolinický pucolán se vyrábí kalcinací kaolinitických jílu při teplotách 600 až 900 °C (rovnice b).



Oxidy hlinité a křemičité jsou doprovázeny dalšími oxidy, a to oxidem železitým, oxidem titaničitým, alkáliemi a volnými oxidy vápníku a hořčíku. Metakaolin lze využít v podobě minerální přísady do betonů a malt, částečně může nahradit cement v rozmezí 5 až 15 % a využití nalézá i v podobě aktivní příměsi do betonu, přičemž lze aplikovat i hrubší frakce metakaolinu v rozmezí 20 až 25 % (rovnice c).



Měrný povrch se pohybuje v rozmezí 2 000 až 20 000 m².kg⁻¹. Metakaolin mírně snižuje počátek a dobu tuhnutí a ve vybraných aplikacích lze metakaolinem nahradit mikrosiliku [5, 16].

Hlavními dodavateli metakaolinu v ČR jsou Sedlecký kaolin a.s. v Božičanech u Kalových Varů, mostecký Keramost, a.s. a České lupkové závody, a.s. v Novém Strašecím u Prahy. České lupkové závody, a.s. dále zpracovávají z úletů při výrobě kaolinitu odpadní odprašky.

4.6 Mikrosilika

Křemičité úlety (mikrosilika) jsou vedlejším výrobním produktem při výrobě křemíku a jeho slitin. S obsahem 80 až 98 % amorfního oxidu křemičitého v podobě dokonale kulovitých zrn průměru 0,1 až 0,2 μm vykazuje výborné pucolánové vlastnosti. Předností je především velký měrný povrch 15 000 až 30 000 $\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$. Plná reakce se projevuje do 18% obsahu křemičitých úletů [12].

Na trhu jsou dostupné křemičité úlety pod obchodními názvy Sioxid, Fesil Silica, Microsilica či Micropoz. Mikrosilika vnáší nemalé klady do výroby silikátových kompozit, její nevýhodou je však vysoká pořizovací cena 20 000 $\text{Kč}\cdot\text{t}^{-1}$ a více, což tuto surovinu vytlačuje z pozice odpadních látek a mikrosilika se stává přirozeným výrobním produktem.

4.7 Struska

Struska a především vysokopecní granulovaná struska, jakožto vedlejší produkt hutní výroby, je jediným známým zástupcem latentně hydraulických látek. Skryté hydraulické schopnosti se plně projevují přidáním budící látky. Základními budiči jsou cement, vápno, hydroxid sodný a některé siřičitany. Z chemického hlediska vzniká hydro-kalcium-silikátová báze. Reaktivnost strusky (I) je dána vztahem 1.

$$I = \frac{\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2}{\text{SiO}_2} \quad (1)$$

Vhodnost využití strusky jako lehčeného plniva je dána vlastní bazicitou strusky. Modul bazicity ($P2$) určuje poměr zásaditých oxidů obsažených ve strusce vůči oxidům kyselým (vztah 2).

$$P2 = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3} \quad (2)$$

Zásaditá struska je vhodná k výrobě zpěněné strusky. Zásaditá struska v podobě granulátu je vhodná k výrobě směsného cementu.

Z mineralogického hlediska se jedná především o Melilith (Gehlenit a Ackermanit), dále Larnit, Šannonit, Mervinit aj.. Struska může podléhat samovolnému rozpadu. Jedná se především o rozpad silikátový a rozpad železomanganitý.

V čerstvém betonu zvyšuje struska zpracovatelnost, zároveň je ale zvyšováno riziko rozměšování. Dávkování probíhá v rozmezí 100 až 300 kg.m⁻³ směsi.

5 NÁVRH KOMPONENTŮ VYVÍJENÉ POTĚROVÉ SMĚSI

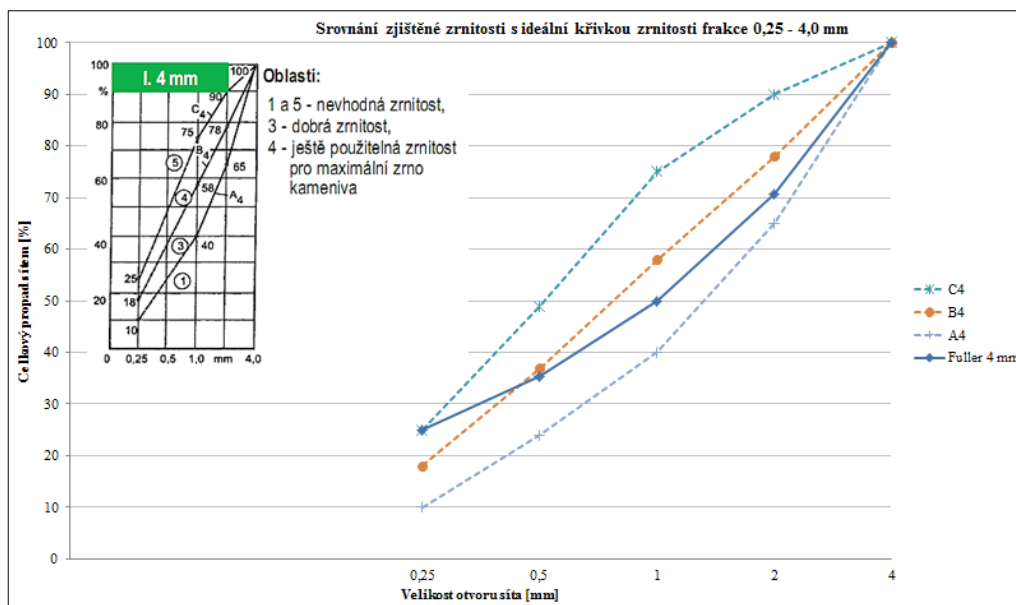
Jednotlivé komponenty suché potěrové směsi byly zvoleny na základě předešlých výzkumů v oblasti potěrových hmot a dále s přihlédnutím na využití odpadních surovin, a to primárně v podobě lehčených plniv.

5.1 Plniva

Skladba plniva frakce 0-4 mm má odpovídat horní polovině křivky zrnitosti dle Fullera (vztah 3, graf 2) [5].

$$y_i = 100 \cdot \sqrt{\frac{d_i}{D_{\max}}} \quad (3)$$

(y_i – celkový propad sítím [%]; d_i – velikost zrna plniva [mm]; D_{\max} – maximální zrno plniva [mm])



Graf 2: Křivka zrnitosti 0,25 - 4 mm dle Fullera.

Křivka zrnitosti by měla být plynulá. Vzhledem k odlišným vlastnostem lehčeného plniva a drobného plniva projevujícího se následnou segregací směsi se jeví jako vhodné pro jednotlivé druhy plniv využít při míšení dvou nepřerušovaných křivek zrnitosti 0-4 mm.

Mezi sorpční vlastnosti lehčeného plniva patří zejména nasákavost vyjadřující množství vody odebrané plnivem v celém jeho objemu v závislosti na době ponoření do kapaliny. Využíváme-li lehčených plniv, je především nutné počítat s případnou zjištěnou hodnotou nasákavosti lehčeného plniva [5].

Voda obsažená v nasáklém plnivu se může podílet na tzv. „*samoošetřovacím efektu*“ během zrání cementového kompozitu. Zde je však nutný průzkum desorpčních vlastností lehčeného plniva. Při brzkém uvolnění nasáklé vody je možný vznik kapilárních dutin [17].

Vlastnosti plniva ovlivňují výslednou mezerovitost směsi (vztah 4). Dobré zrnitosti lze dosáhnout při mezerovitosti 0,16 až 0,24. Výhodné je dosáhnout co nejnižší mezerovitosti.

$$M = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_k} \quad (4)$$

(M – mezerovitost plniva [-]; ρ_s – sypná hmotnost plniva v setřeseném stavu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]; ρ_k – objemová hmotnost plniva [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$])

5.2 Cement

Vzhledem k ekonomické náročnosti výroby pojiva na bázi portlandského slínku, zobrazujícího se následně v tržní ceně, je nutné během návrhu omezit množství cementu na co nejmenší množství. Dávka cementu při běžné konzistenci by neměla překročit $450 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Jeho množství musí být však dostatečné k plnému obalení zrn plniva [5].

5.3 Popílek

Ekonomicky náročný cement lze vhodně nahradit popílkem do 30 % (*Kind, 1958*). Při návrhu směsi je však nutné počítat s jinou objemovou hmotností popílku a náhradu cementu uvažovat objemově a následně přepočítat na hmotnostní podíl [18].

Při 15% až 25% náhradě cementu popílkem vykazuje směs výbornou zpracovatelnost a vysokou soudržnost, zároveň také zabráňuje bleedingu a zvyšuje dobu tuhnutí [5].

Při návrhu potěrové směsi s částečnou náhradou cementu popílkem je nutné počítat se zvýšením vodního součinitele dle vztahu 5.

$$w = \frac{m_{voda}}{m_{cement} + k \cdot m_{popilek}} \quad (5)$$

(w - vodní součinitel [-]; m_{voda} - hmotnost vody [kg]; m_{cement} - hmotnost cementu [kg]; $m_{popilek}$ - hmotnost popílku [kg]; k - normovaná konstanta pro změnu vodního součinitele)

Dle ČSN EN 450 „Popílek do betonu“ se při návrhu betonu s využitím CEM 42,5 volí konstanta $k = 0,4$. Dále by se obsah cementu neměl snížit o více než je minimální obsah cementu násobený koeficientem k a zároveň je podmiňující platnost vztahů 6 a 7 [19].

$$\frac{m_{cement} + m_{popilek}}{m_{cement, minimum}} > 1 \quad (6)$$

(m_{cement} - hmotnost cementu [kg]; $m_{popilek}$ - hmotnost popílku [kg]; $m_{cement, minimum}$ - minimální požadovaná hmotnost cementu [kg])

$$\frac{m_{popilek}}{m_{cement}} \leq 0,33 \quad (7)$$

(m_{cement} - hmotnost cementu [kg]; $m_{popilek}$ - hmotnost popílku [kg])

Vzhledem k vysoké ceně portlandského cementu pevnostní třídy 42,5 je vhodné využít 25% náhrady cementu popílkem.

5.4 Mikrosilika

Křemičité úlety vykazují v porovnání s cementem vyšší spotřebu vody. Koeficient k ve vztahu 8 činí pro CEM I 42,5 celých 2.

$$w = \frac{m_{voda}}{m_{cement} + k \cdot m_{mikrosilika}} \quad (8)$$

(w - vodní součinitel [-]; m_{voda} - hmotnost vody [kg], m_{cement} - hmotnost cementu [kg]; $m_{mikrosilika}$ - hmotnost křemičitých úletů [kg]; k - normovaná konstanta pro změnu vodního součinitele)

Návrh skladby směsi s využitím mikrosiliky a obsahem cementu v množství nad 300 kg.m⁻³ směsi by neměl snižovat obsah cementu o více než 30 kg.m⁻³ směsi. Dále je maximální obsah mikrosiliky omezen dle vztahu 9 [19].

$$\frac{m_{mikrosilika}}{m_{cement}} \leq 0,11 \quad (9)$$

(m_{cement} - hmotnost cementu [kg]; $m_{mikrosilika}$ - hmotnost křemičitých úletů [kg])

Využití mikrosiliky do 3 % z hmotnosti cementu má vždy příznivý vliv na výsledné vlastnosti betonu (Lahovský, 1958). Snížení ekonomického dopadu ceny křemičitých úletů lze redukovat využitím na trhu dostupných méně kvalitních typů mikrosiliky. V případě náhrady méně kvalitní surovinou lze zároveň počítat i se snížením kvalitativních vlastností výsledného kompozitu.

5.5 Návrh skladby

Při návrhu skladby potěrové hmoty se snažíme snížit potřebné množství cementového pojiva na minimum. K výpočtu minimálního množství cementové matrice je nutné znát fyzikální charakteristiky užitých plniv, včetně jejich poměrů vyplývajících z křivek zrnitosti. V případě zvýšené mezerovitosti je nutné počítat se zvýšeným podílem cementového tmele.

Při návrhu ideální skladby plniv lze dojít k uvažované křivce několika způsoby:

Výpočtové rovnice pro mísení plniv dvou frakcí

Výsledky zrnitosti poslouží k návrhu skladby plniva. Pro jednotlivé typy plniv bude vypočteno číslo zrnitosti k (Abrams). Za pomoci hodnoty „ k “ se vypočte poměr mísení plniv s přihlédnutím na křivku zrnitosti dle Fullera, případně se stanoví nejvhodnější poměr mísení plniv.

Čistě matematický přístup při mísení více frakcí plniv

Známe-li zrnitosti vstupu i požadovaného výstupu dle jednotlivých normových sít, lze přistoupit k matematickému výpočtu optimální zrnitosti. Výstupem matematického výpočtu musí být nezáporné hodnoty, v jiném případě je výsledek nepoužitelný [20].

Teoretický model

Teoretický model výpočtu vychází ze zpracování křivek zrnitosti v softwarovém prostředí s granulometrickým grafickým výstupem. Nutným požadavkem je znalost zrnitosti jednotlivých vstupů a očekávané zrnitosti.

Principem této metody je stanovení požadované křivky zrnitosti a následné určování podílu jednotlivých plniv vzhledem ke změnám výsledné křivky zrnitosti v porovnání se zrnitostí požadovanou.

Model založený na softwarovém vyhodnocení výsledků

Dnešní elektronický trh nabízí řadu méně i více složitých softwarových aplikací pro případný vývoj stavebních hmot. Významným programem v české sféře je především aplikace Aggmix 3.0. Aplikační programy jsou však stále ve vývoji a tudíž je i práce v jejich aplikačním prostředí založena na zkušenostech technologa a zároveň na vhodných zrnitostech jednotlivých vstupů.

Známe-li hmotnostní poměry plniv a zároveň známe-li jejich základní fyzikální charakteristiky, lze přejít k výpočtu zastoupení jednotlivých složek směsi. Samotný model výpočtu se může odehrávat těmito známými postupy:

Výpočet obálky cementového tmele

Potřebné množství cementu je závislé na měrném povrchu plniva. Plnivo je nutné obalit cementovým tmelem, jehož objem lze vypočítat dle vztahu 10, případně 11.

$$V_{ct} = \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{w \cdot m_c}{\rho_v} + \frac{m_p}{\rho_p} + \frac{p_{0,25} \cdot m_k}{100 \cdot \rho_k} \quad (10)$$

(V_{ct} – objem cementového tmele [m^3]; m_c – obsah cementu [kg]; ρ_c – objemová hmotnost cementu [$kg \cdot m^{-3}$];
 w – vodní součinitel [-]; ρ_v – objemová hmotnost vody [$kg \cdot m^{-3}$]; m_p – hmotnost příměsí [kg]; ρ_p – objemová
hmotnost příměsí [$kg \cdot m^{-3}$]; $p_{0,25}$ – podíl jemných částic pod 0,25 mm [%]; m_k – hmotnost plniva [kg]; ρ_k – objemová
hmotnost plniva [$kg \cdot m^{-3}$])

$$V_{ct} = v \cdot M \quad (11)$$

(V_{ct} – objem cementového tmele [m^3]; v – nadbytek cementového tmele [-]; M – mezerovitost směsi plniv [m^3])

Nadbytek cementového tmele v se doporučuje v rozmezí 1,05 až 1,40 (výjimečně se udává 1,5).

Návrh skladby potěrové směsi může probíhat metodou podle CH. T. Kennedy. Potřebné množství cementu se vypočítá zvlášť pro každou směs, a to především v závislosti na různých hodnotách výpočtových součinitelů (vzhledem k různorodým tvarovým vlastnostem využitých lehčených plniv).

Křivka zrnitosti odpadního písku by měla vyhovovat horní části křivky zrnitosti dle Fullera (Tab. 4).

Tabulka 4: Propady sítem při zrnitosti dle Fullera.

Síto [mm]	Propad sítem [%]
0,063	13
0,125	18
0,25	25
0,5	35
1	50
2	71
4	100

Výpočet povrchové plochy zrn plniv uvádí vztah 12.

$$F = f \cdot \left(\frac{\rho_{k,t}}{\rho_k} \right) \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{p_i}{d_i} \right) \quad (12)$$

(F – povrchová plocha plniva [m²]; f – koeficient tvaru zrn (6 – plnivo těžené, kulového tvaru; 8 – plnivo těžené; 12 – plnivo drcené); $\rho_{k,t}$ – objemová hmotnost plniva [kg.m⁻³]; $\rho_{k,t}$ – sypná hmotnost plniva v setřeseném stavu [kg.m⁻³]; p_i – nadsítný zbytek plniva[%]; d_i – průměrná velikost zrna nadsítného zbytku [cm])

Potřebný obsah cementového tmele (vztah 13) je závislý nejen na povrchu plniva a vrstvě samotného tmele, ale zároveň závisí i na mezerovitosti plniva (uvažujeme potěrovou hmotu bez dutin a kaveren).

$$V_{ct} = M + F \cdot \delta \quad (13)$$

(V_{ct} – objem cementového tmele [m³]; M – mezerovitost plniva [m³]; F – povrchová plocha plniva [m²]; δ – tloušťka cementového tmele [m])

Vypočteme vodní součinitel dle Bolomeye (vztah 14).

$$R_{B,28} = \alpha \cdot R_c \cdot \left(\frac{1}{w} - 0,5 \right) \quad (14)$$

(α – konzistenční součinitel dle zkoušky sednutí kužele [m]; R_c – pevnost cementové matrice v tlaku [N.mm⁻²]; w – vodní součinitel [-])

Vodní součinitel je nutné upravit dle vzorců 3 a 6. Hmotnost cementu vypočítáme ze vztahu 15 [21].

$$m_c = \frac{V_{ct}}{\left(\frac{w}{100} + \frac{1}{\rho_c}\right)} \quad (15)$$

(V_{ct} – objem cementového tmele [m^3]; w – vodní součinitel [-]; ρ_c – měrná hmotnost cement [kg.m^{-3}])

Množství vody pro danou záměs vypočteme ze vztahu 16 a přičteme množství vody odpovídající nasákavosti lehčeného plniva určené po 30-ti minutách. Následně provedeme kontrolu minimálního množství vody (vztah 17) potřebné na hydrataci cementu a k smáčení plniva [12].

$$m_v = w \cdot m_c \quad (16)$$

(m_v – hmotnost vody [kg]; w – vodní součinitel [-]; m_c – hmotnost cementu)

$$m_v = 0,23 \cdot m_c + 0,35m_p + m_k \cdot \sum m_{VVi}, \text{ kde } m_{VVi} = \frac{p_i \cdot n}{100} \cdot \sqrt[3]{d_i \cdot d_{i+1}} \quad (17)$$

(n – spotřeba vody na ovlhčení 1 kg plniva od velikosti nad 0,25 mm [kg.kg^{-1}] ($n = 0,23$ pro jemné plnivo a $n = 0,30$ pro popílek))

Z rovnice absolutních objemů (vztah 18) určíme potřebné množství plniva.

$$\frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_v}{\rho_v} + \frac{m_k}{\rho_k} + \frac{m_p}{\rho_p} = 1 - \frac{V_{vz}}{100} \quad (18)$$

V případě znalosti pevnostních charakteristik využitého plniva lze dle Bacha zjistit přibližnou pevnost cementového kompozitu (vztah 19).

$$\sigma_{bpk} = (\sigma_{cm})^{V_{cm}} \cdot (\sigma_{pk})^{V_{pk}} \quad (19)$$

(σ_{bpk} – pevnost v tlaku betonu s pórovitým plnivem [N.mm^{-2}]; σ_{cm} – pevnost v tlaku cementové malty při daném vodním součiniteli [N.mm^{-2}]; σ_{pk} – válcová pevnost pórovitého plniva [N.mm^{-2}]; V_{cm} – poměrný objem cementové malty [-]; V_{pk} – poměrný objem pórovitého plniva [-])

Podíl mikrosiliky a popílku bude uvažován ve změně vodního součinitele.

Návrh na základě stejného množství pojivové báze

V tomto případě je při mísení rozhodující především znalost podílu dodaného plniva, který musí zůstat při návrhu konstantní. Nadále však nepočítáme s povrchovou plochou plniv, nýbrž rovnou srovnáváme výsledky jednotlivých receptur a následně snižujeme obsah pojivové báze, případně volíme složení pojivové báze tak, aby vyhovovalo fyzikálním i chemickým požadavkům na potěrovou hmotu.

5.6 Alkáliové rozpínání

Alkalická reakce kameniva se složkami cementu (AR, alkáliové rozpínání) patří mezi činitele způsobující degradaci betonu. V průběhu několika let až desetiletí stárnutí betonu vzniká na povrchu kameniva obsahujícího reaktivní formu oxidu křemičitého obalová vrstva schopná expanze absorpcí vody. Při bobtnání tenké obalové vrstvičky dochází ve hmotě k vnitřním tlakům, které jsou v počátku rozpínání částečně vyrovnávány pórovým systémem hmoty. Nejsou-li expanzivní tlaky vyrovnány, dochází k poruchám vnitřní struktury a následně i k lepšímu přístupu vlhkosti k poruchovým místům, což má za následek umocnění samotné expanze a následně i urychlení degradace konstrukce.

Rozeznáváme dva typy AR, a to reakci alkálií s reaktivním oxidem křemičitým (AKR, alkalicko-křemičitá reakce), případně s dolomity (AUR, alkalicko-uhličitá reakce).

Základním předpokladem pro vznik AKR je hodnota relativní vlhkosti nad 80%, zvýšená teplota, vysoké pH roztoku a především obsah reaktivní formy kameniva (opál, chalcedon, křemen, cristobalit, tridymit, rohovec, vulkanická skla a celkově vulkanické horniny, břidlice a jílovité břidlice, meta-droby, fylity, aj.).

Prevence před expanzivními účinky AKR na vnitřní strukturu hmoty s plnivý obsahujícími reaktivní formu oxidu křemíku může být založena na uložení betonu ve vnitřní části konstrukce bytové výstavby, jelikož vnitřní části konstrukce v tomto případě nejsou ve větší míře vystaveny působení nadměrné relativní vlhkosti vzduchu.

V případě vystavení betonového prvku vůči působení zvýšené vlhkosti je důležitý především poměr alkálií a reaktivní formy oxidu křemičitého. Zapotřebí je vyšší obsah alkálií než obsah reaktivních částic. Obsah alkálií lze kontrolovat především u cementu, kdy při hranici 0,6 % $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv.}}$ by nemělo docházet ke vzniku AK gelu, případně na hranici 0,4 % $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv.}}$ s ohledem na vliv alkálií přidávaných s plnivý a zároveň na vliv externího přístupu alkálií.

Pro nově vzniklé hmoty s využitím reaktivních typů kameniv je vhodné nahradit část portlandského cementu úletovým popílkem třídy F (náhrada cementu z 20 %), případně využít směsných cementů. Mimo popílek lze využít i strusky (v 50% náhradě), případně metakaolinu, křemičitých úletů, přírodních pucolánů aj.

Výhodou pucolánů je především vytváření hutnější hmoty, omezující přesun iontů potřebných pro vznik AKR a následného bobtnání AK gelu. K potlačení rizika AKR lze využít i dalších metod založených na přidavku lithiových, případně baryových solí [22].

II PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍL PRÁCE

Cílem práce je návrh vhodné receptury pro lehčenou cementovou potěrovou hmotu do občanské výstavby s možností alternativního využití ve výstavbě průmyslové.

Návrh potěrové hmoty se odvíjí od příslušných technických předpisů, od dosavadních výzkumů a zároveň od vlastností dostupných komerčních směsí. Při návrhu modifikovaných potěrových receptur vyplývá snaha předčít vlastnosti komerčních směsí. Především se jedná o dosažení srovnatelných fyzikálně-mechanických vlastností hmoty a v neposlední řadě je cíleně řešena i ekonomická stránka materiálového složení tak, aby byly splněny požadavky na co nejnižší výrobní náklady.

Vlastnosti referenčních hmot jsou porovnávány se vzorky modifikovanými částečnou náhradou plniva referenčních hmot v podobě sklářského písku lehčeným plnivem vyráběným z přírodních surovin i lehčeným plnivem odpadním, případně lehčeným plnivem vyráběným z odpadních látek.

Cílem práce je dále srovnání vlivu jednotlivých lehčených plniv na vlastnosti cementové potěrové hmoty. Zároveň je vzhledem ke stanoveným plnivům řešena i otázka možnosti vzniku alkalicko-křemičité reakce a jsou navrženy i postupy k zamezení vzniku alkalicko-křemičité reakce v rizikovém prostředí.

Závěrem jsou jednotlivé výsledky porovnány z ekonomicko-technického hlediska a optimalizačním výpočtem je určena nejvhodnější receptura pro přípravu potěrové hmoty s částečnou náhradou plniva v podobě sklářského písku plnivem lehčeným.

7 METODIKA PRÁCE

Metodika práce je rozdělena do několika na sebe navazujících etap. Tématem etapy I je celkové řešení metodiky diplomové práce. Etapa II se zaměřuje na přípravu zkušebních těles komerčních hmot a zároveň na zkoušky prováděné na komerčních hmotách. Etapa III se zabývá výběrem vhodných pojiv a aditiv a zároveň výběrem vhodných plniv do potěrové hmoty. Vhodností částečné náhrady původního plniva v podobě sklářského písku jednotlivými lehčenými plnivy se zabývá etapa IV. Etapa V je věnována výrobě a zkoušení referenční potěrové hmoty bez užití lehčených plniv. Etapa VI se již zabývá přímo výrobou a zkouškami na potěrových hmotách částečně vylehčených jednotlivými typy lehčených plniv. V závěrečné etapě VIII dochází k optimalizaci receptur na základě předem daných optimalizačních kritérií a samotnou optimalizací je vyhodnocena nejvhodnější směs pro přípravu potěrové hmoty.

Tabulka 5: Použité zkušební postupy.

Zkouška	Norma	Vzorek	Úprava vzorku
Stanovení zrnitosti	ČSN EN 933-1	Navážka	Sušením
Pevnost v tahu za ohybu	ČSN EN 13892-2	40 x 40 x 160 mm	-
Pevnost v tlaku	ČSN EN 13892-2	40 x 40 x min. 40 mm	-
Stanovení součinitele tepelné vodivosti	ČSN EN 993-14	100 x 100 x 400 mm	100 x 100 x 200 mm
Stanovení mikrotvrdosti povrchu	ČSN EN 13892-6	40 x 40 x 160 mm	-
Stanovení odolnosti proti obruš	ČSN EN 13892-3	100 x 100 x 100	70 x 70 x min. 30 mm

ETAPA I Návrh a metodika zkušebních

Komerční směs

- Granulometrie
- Navážení suchých komponent potěrové směsi
- Mísení s vodou, ověření konzistence
- Výroba zkušebních těles

Referenční receptura

- Návrh receptury
- Návrh mísení plniv
- Navážení suchých komponent
- Stanovení vodního součinitele
- Mísení s vodou, ověření konzistence
- Výroba zkušebních těles

Modifikovaná receptura

- Návrh náhrady sklářského písku lehčeným plnivem
- Návrh mísení plniv
- Navážení suchých komponent
- Stanovení vodního součinitele
- Mísení s vodou, ověření konzistence
- Výroba zkušebních těles

ETAPA II Zkoušky komerčních směsí

Rozbor suché směsi	<ul style="list-style-type: none"> • Stanovení zrnitosti suché potěrové směsi • Chemická analýza směsi
Příprava zkušebních těles	<ul style="list-style-type: none"> • Stanovení hodnoty vodního součinitele v závislosti na zpracovatelnosti směsi • Zkoušky konzistence • Výroba zkušebních těles <ul style="list-style-type: none"> • 40 x 40 x 160 mm na stanovení objemové hmotnosti, tvrdosti povrchu, pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku • 100 x 100 x 100 mm na stanovení odolnosti proti obruš (úprava řezáním na 71 x 71 x min. 30 mm) • 100 x 100 x 400 mm na stanovení součinitele tepelné vodivosti (úprava řezáním těles na velikost vzorků 100 x 100 x max. 200 mm) • Vlhkostní uložení zkušebních těles
Prováděné zkoušky	<ul style="list-style-type: none"> • Zkouška objemové hmotnosti na tělesech o rozměrech 40 x 40 x 160 mm • Zkouška povrchové pevnosti na tělesech o rozměrech 40 x 40 x 160 mm • Zkouška pevnosti v tahu za ohybu na tělesech rozměrů 40 x 40 x 160 mm měřená v 7, 28 a 90 dnu zrání • Zkouška pevnosti v tlaku na zlomcích trámů rozměrů 40 x 40 x min. 40 mm měřená v 7, 28, a 90 dnu zrání • Zkouška odolnosti proti obruš metodou Böhme na tělesech o rozměrech 71 x 71 x 40 mm

ETAPA III Výběr vhodných surovin

Pojiva

- CEM I 42,5 R (Hranice)
- Popílek Dětmárovice
- Aditiva
 - Mikrosilika Sioxid Microsit
 - Plastifikátor Elotex FL 1200, Melment M10

Plniva

- **Výběr dostupných odpadních látek a kameniv z nich vyráběných**
- Plniva z odpadních látek - neupravovaná
- Plniva vyráběná z odpadních látek
- Přírodní plniva - neupravovaná
- Plniva vyráběná z přírodních látek
- **Výběr surovin na základě**
 - Zrnitosti a obsahu cizorodých látek
 - Hořlavosti
 - Dostupnosti na trhu

Vybraná plniva

Pěnové sklo Geocell

Sklopěnový granulát Poraver

Mikrosféry Q-CEL-7014

Mikrosféry Omega-SPHERES W300

Kamenivo Liapor

Expandovaný vermikulit

Expandovaný perlit

ETAPA IV Vliv množství lehčeného kameniva na výsledné vlastnosti hmoty

Výběr plniv

- Expandovaný perlit EP 100, EP 150, EP 180
- Expandovaný vermikulit Superfine
- Mikrosféry Q-CEL-7014
- Mikrosféry Omega-SPHERES W300

Postup

- Návrh receptury
 - Poměr cementu ku kamenivu 1:3
 - Expandovaný perlit a vermikulit, mikrosféry Q-CEL-7014 a Omega-SPHERES W300 přidávány objemově
 - Liapor přidáván hmotnostně
- Návrh 5%, 10%, 15% a 20 % náhrady původního nelehčeného plniva plnivem lehčeným
- Návrh zkušebního postupu
 - Příprava zkušebních těles na základě testu konzistence
 - Srovnání vlivu vodního součinitele
 - Srovnání vlivu jednotlivých typů lehčených plniv v závislosti na obsahu lehčeného plniva v potěrové hmotě

ETAPA V Návrh receptury

Návrh skladby

- Na základě skladby komerčních směsí
- Na základě normativních požadavků
- Na základě mísení kameniv
- Na základě předešlých výzkumů fakulty stavební

Pojiva a aditiva

- CEM I 42,5 R (Hranice)
- Popílek Dětmárovice
- Aditiva
 - Mikrosilika Sioxid Microsit
 - Plastifikátor Elotex FL 1200, Melment M10

Plnivo referenční směsi

- Sklářský písek

Plnivo modifikované směsi

- 20%, 40% a 60% náhrada sklářského písku plnivem lehčným
- 10 % kombinovaná náhrada sklářského písku expandovaným perlitem
- 5 % kombinovaná náhrada sklářského písku mikrosfěrami Q-CEL-7014
- 15 % kombinovaná náhrada sklářského písku expandovaným vermikulitem

ETAPA VI Zkoušky na referenčních potěrových hmotách

Příprava zkušebních těles

- Stanovení vodního součinitele v závislosti na zpracovatelnosti směsi
- Zkoušky konzistence
- Výroba zkušebních těles
 - 40 x 40 x 160 mm na stanovení objemové hmotnosti, tvrdosti povrchu, pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku
 - 100 x 100 x 100 mm na stanovení odolnosti proti obruš (úprava řezáním na 71 x 71 x min. 30 mm)
- Vlhkostní uložení zkušebních těles

Prováděné zkoušky

- Zkouška objemové hmotnosti na tělesech 40 x 40 x 160 mm
- Zkouška mikrotvrdosti povrchu na tělesech o rozměrech 40 x 40 x 160 mm
- Zkouška pevnosti v tahu za ohybu na tělesech o rozměrech 40 x 40 x 160 mm měřená v 28 dnu zrání
- Zkouška pevnosti v tlaku na zlomcích trámců rozměrů 40 x 40 x min. 40 mm měřená v 28 dnu zrání
- Zkouška odolnosti proti obruš na tělesech o rozměrech 71 x 71 x 40 mm

ETAPA VII Zkoušky na modifikovaných tělesech

Příprava zkušebních těles

- Stanovení vodního součinitele v závislosti na zpracovatelnosti směsi
- Zkoušky konzistence
- Výroba zkušebních těles
 - 40 x 40 x 160 mm na stanovení objemové hmotnosti, tvrdosti povrchu, pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku
 - 100 x 100 x 100 mm na stanovení odolnosti proti ohrusu (úprava řezáním na 71 x 71 x min. 30 mm)
- Vlhkostní uložení zkušebních těles

Prováděné zkoušky

- Zkouška objemové hmotnosti na tělesech o rozměrech 40 x 40 x 160 mm
- Zkouška mikrotvrdosti povrchu na tělesech o rozměrech 40 x 40 x 160 mm
- Zkouška pevnosti v tahu za ohybu na tělesech o rozměrech 40 x 40 x 160 mm měřená v 28 dnu zrání
- Zkouška pevnosti v tlaku na zlomcích trámů rozměrů 40 x 40 x min. 40 mm měřená v 28 dnu zrání
- Zkouška odolnosti proti ohrusu na vybraných tělesech o rozměrech 71 x 71 x 40 mm

ETAPA VIII Optimalizační vyhodnocení modifikovaných receptur

Optimalizační kritéria

Zpracovatelnost
Objemová hmotnost
Pevnost v tahu za ohybu
Pevnost v tlaku
Dostupnost (vzdálenost dodavatel – odběratel)
Celková cena plniva

Posouzení

Optimalizační výpočet
Vyhodnocení výsledků
Výběr nejvhodnější suroviny
Ekonomické zhodnocení
Závěr

8 ZKUŠEBNÍ POSTUPY

Jednotlivé zkušební postupy byly prováděny v souladu s níže uváděnými technickými předpisy, v případě nevyhovujícího předpisu vzhledem k jinému typu suroviny byly některé zkoušky modifikovány.

8.1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Stanovení zrnitosti síťovým rozbořem (ČSN EN 933-1)

Zkušební pomůcky: Sada sít (velikost ok 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 16; 31,5 mm doplněná o síto 0,09 mm v případě zkoušení popílku), střásací zařízení, jemné štětce, váhící zařízení, sušárna se samočinným udržováním nastavené teploty.

Zkušební postup: Do ustálené hmotnosti vysušené plnivo (hmotnost by se po 24 hodinách neměla měnit více jak o 0,2%) se odebere v minimálním množství 200 g v případě plniva zrnitosti pod 4 mm (pro lehčené plnivo modifikujeme množství zkušební navážky dle objemové hmotnosti lehčeného plniva, minimálně navážka 100 g). Mechanické prosévání se doplňuje proséváním ručním a dále se váží zbytky na jednotlivých zkušebních sítích. V případě lehkého plniva je nutné nevyvíjet na štětec při závěrečném prosévání vyšší tlaky, kdy dochází k drcení lehčeného plniva ve styku se sítím. Dílčí zbytky na sítích se naváží a vypočte se celkový zbytek na každém sítě a celkový propad každým sítím.

8.2 Stanovení sypané hmotnosti volně sypaného plniva, setřeseného kameniva a stanovení mezerovitosti (ČSN EN 1097-3)

Zkušební pomůcky: Nádoba o objemu 1 litr (plnivo do 4 mm), sušárna, váhy, vibrační zařízení.

Zkušební postup: Zváží se prázdná nádoba. Do ustálené hmotnosti vysušené plnivo se sype do nádoby o objemu z výšky maximálně 50 mm nad horním okrajem nádoby, vrchní část plniva nad nádobou se oddělí a nádoba i s plnivem zváží pro stanovení sypané hmotnosti plniva (vztah 1). Dále se nádoba vibruje za současného přidávání plniva do požadovaného objemu. Vážením nádoby a následným dopočtem se zjišťuje

sypná hmotnost zhutněného plniva (vztah 20) a dále dopočítá mezerovitost plniva (vztah 21) volně sypaného a mezerovitost plniva ve zhutněném stavu.

$$\varphi_s = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad [\text{kg.m}^{-3}] \quad (20)$$

(φ_s – sypná hmotnost plniva [kg.m^{-3}]; m_2 – hmotnost nádoby s plnivem [kg]; m_1 – hmotnost prázdné nádoby [kg]; V – objem nádoby [kg.m^{-3}])

$$v_s = \frac{\varphi_p - \varphi_s}{\varphi_p} \cdot 100 \quad [\%] \quad (21)$$

(v_s – mezerovitost plniva [%]; φ_p – objemová hmotnost plniva [kg.m^{-3}]; φ_s – sypná hmotnost plniva [kg.m^{-3}])

8.3 Objemová hmotnost zrn a nasákavosti (ČSN EN 1097-6)

Při zkoušce nasákavosti se volí minimální navážku 350 g, dále při zkoušce objemové hmotnosti dle velikosti maximálního zrna (8 mm – navážka 500 g, 4 mm a méně – 250 g). Plnivo se vloží do nádoby, doplní vodou a nechá 24 hodin ustát. Po odlití vody se plnivo povrchově osuší a zváží (m_a). Následně se osušený vzorek vloží do pyknometru. Pyknometr se zaplní vodou a protřepe z důvodu úniku nadbytečného vzduchu. Následně se doplní vodu až po hrot, externě osuší a zváží (m_b). Poté se vyjme obsah a nechá vyschnout v sušárně při teplotě $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ (m_d). Mezitím se vyčištěný pyknometr naplní kapalinou po hrot a zváží. Vážení probíhá s přesností na 0,001 g. Výsledek se zaokrouhlí na nejbližších 10 kg.m^{-3} .

$$\rho_{ps} = \frac{m_a}{m_a - (m_b - m_c)} \cdot \rho_w \quad [\text{kg.m}^{-3}] \quad (22)$$

(ρ_{ps} – objemová hmotnost nasáklého plniva [kg.m^{-3}]; m_a – hmotnost povrchově osušeného plniva [g]; m_b – hmotnost pyknometru s plnivem a vodou [g]; m_c – hmotnost pyknometru s vodou [g]; ρ_w – objemová hmotnost vody [kg.m^{-3}])

$$\rho_{po} = \frac{m_d}{m_a - (m_b - m_c)} \cdot \rho_w \quad [\text{kg.m}^{-3}] \quad (23)$$

(ρ_{po} – objemová hmotnost vysušeného plniva [kg.m^{-3}]; m_a – hmotnost povrchově osušeného plniva [g]; m_b – hmotnost pyknometru s plnivem a vodou [g]; m_c – hmotnost pyknometru s vodou [g]; m_d – hmotnost vysušeného vzorku [g]; ρ_w – objemová hmotnost vody [kg.m^{-3}])

$$w_{cm} = \frac{m_a - m_d}{m_d} \cdot 100 \quad [\%] \quad (24)$$

(w_{cm} – nasákavost plniva [%]; m_a – hmotnost povrchově osušeného plniva [g]; m_d – hmotnost vysušeného vzorku [g])

8.4 Výroba a ošetření zkušebních těles (ČSN EN 13892-1)

Pomůcky: Kovové formy o vnitřních rozměrech dle typu zkušebního tělesa, váhící a mísící zařízení.

Postup: Odběr materiálu komerčních směsí pro výrobu zkušebních těles musí probíhat v minimálním množství 5000 g. Materiál musí být kvartován z důvodu optimální reprezentace vlastností výsledné hmoty. V mísícím zařízení určeného výrobcem potěrové hmoty se smísí suchá směs se záměsovou vodou v množství předepsaném výrobcem. Provedou se zkoušky konzistence a zjištění objemové hmotnosti čerstvé potěrové hmoty. Hmotu se nechá zatvrdnout ve formě ošetřené vůči rychlému odsunu hydratační vody. Po zatvrdnutí se tělesa vyjmou z formy, řádně označí a uloží (v případě cementového potěru do úložny s teplotou 20 ± 2 °C a relativní vlhkostí 65 ± 5 %).

8.5 Stanovení povrchové tvrdosti a objemové hmotnosti (ČSN EN 13892-6)

Zkušební pomůcky: Zařízení schopné měřit hloubku vniku kulového tělesa s přesností 0,01 mm (nutnou součástí zařízení je mechanismus schopný přenést požadované zatížení 500 N na zkušební těleso a případně nástavec na kulové zatěžovací těleso, Obr. 18), kulové zatěžovací těleso průměru 10 mm (případně náhrada nenormovým kulovým tělesem připevněným ke zkušebnímu zařízení válcovým nástavcem), zkušební váhy, délkové měřicí zařízení.

Zkušební tělesa: Normové trámce rozměrů 40 x 40 x 160 mm, 3 kusy.

Zkušební postup: Zkušební těleso se nejprve zváží a dále se změří rozměry pro stanovení objemové hmotnosti zatvrdlého materiálu. Poté se vloží těleso do zkušebního zařízení a předběžně zatíží hmotností 10 N. Následně, bez vyvolání rázu na těleso, se



Obrázek 18: Höpplerův konzistometr.

zatížení zvýší na 500 N a nechá působit po dobu 60 sekund. Po jedné minutě se těleso odtíží na předběžné zatížení 10 N a vyčká se jednu minutu do ustálení přístroje. Na záznamovém číselníku se odečte hodnota hloubky vtisku kulového tělesa. Pro každé těleso je nutné provést tři zkušební měření.

Vyhodnocení výsledků: Pro každé těleso se vypočte hodnota povrchové pevnosti. Následně se vypočte aritmetický průměr tří hodnot povrchových pevností jednotlivých zkušebních těles.

8.6 Stanovení součinitele tepelné vodivosti (ČSN EN 933-14)

Stanovení součinitele tepelné vodivosti metodou topného drátu dle ČSN EN 933-14 „*Zkušební metody pro žáruvzdorné výrobky tvarové hutné - Část 14: Stanovení tepelné vodivosti metodou topného drátu (křížové uspořádání)*“ se provádí na tělesech o minimálních rozměrech 100 x 100 x 200 mm, přičemž se využívá pro každé měření hmoty tří vzorků tvořících zkušební sadu. Vzhledem k přesnostem výsledků je nejvhodnější měřit tělesa kolmo ke straně hutnění, a to především k odlišným vlastnostem v jednotlivých částech hmoty daných hutněním a celkovou homogenizací směsi. Odchylka rovinnosti měřených ploch by neměla být větší než 0,2 mm. Požadována je čistá plocha bez většího výskytu prachových částic, s minimálními povrchovými poruchami hmoty, včetně otevřených kaveren. Každé těleso měříme pětkrát.

Měření probíhá na předem vytemperovaném přístroji se záznamným zařízením sledující teplotu topného drátu. Softwarové vyhodnocení je založeno na hodnotách nárůstu teploty topného drátu během měření za stejných externích podmínek.

8.7 Stanovení pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu (ČSN EN 13892-6)

Zkušební tělesa: Zkušební normová tělesa o rozměrech 40 x 40 x 160 mm připravená a ošetřená na základě požadavků ČSN EN 13892-1.

Zkušební zařízení: Zařízení schopné vyvolat kontinuálně narůstající zatížení na mechanismus namáhající zkušební těleso a zároveň schopné měřit sílu zatížením vyvolanou.

Zkušební postup: Těleso se změří, zváží a vloží kolmo na hutněnou stranu do mechanismu určeného pro zatěžování tělesa tahem za ohybu o rozpětí podpor 80 mm (Obr. 19). Plynule se zatěžují do porušení tělesa. Zapiše se síla potřebná k přelomení tělesa. Oba zlomky trámečků se postupně vkládají do mechanismu vyvolávajícího na těleso rovnoměrný tlak pomocí protisměrných ploch rozměrů 40 x 40 mm, opět kolmo na hutněnou stranu, dbá se na přesah 5 až 10 mm ze strany tělesa přilehlého k původnímu bednění tělesa (Obr. 20). Zapiše se síla potřebná k porušení tělesa tlakovým namáháním a vypočte průměrná pevnost tělesa v tlaku (vztah 26) a v tahu za ohybu (vztah 25) s přesností na 0,1 N.mm⁻².



Obrázek 19: Těleso při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu.



Obrázek 20: Těleso při zkoušce pevnosti v tlaku.

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot l}{b \cdot d^2} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (25)$$

(R_f – pevnost v tahu za ohybu [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]; F_f – zatěžovací síla [N]; l – rozpětí podpěr [mm]; b – šířka trámce [mm]; d – výška trámce [mm])

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (26)$$

(R_c – pevnost v tlaku [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]; F_c – zatěžovací síla [N]; A – zatěžovací plochy [mm^2])

8.8 Odolnost proti obrusu metodou Böhme (ČSN EN 13892-3)

Zkušební pomůcky: Brusný kotouč, brusivo, váhací a měřicí zařízení.

Zkušební tělesa: Vzorek zatvrdlé potěrové hmoty o rozměrech spodních hran $71 \pm 1,5$ mm a minimální výšky 30 mm vyrobený úpravou řezáním tělesa 100 x 100 x 100 mm.

Zkušební postup: Stanoví se hmotnost zkušebního tělesa s přesností 0,1 g a změří rozměry. Na brusnou dráhu se nasype 20 g brusiva, těleso se upevní a následně zatíží silou 294 ± 3 N. Těleso se brousí po dobu 1 cyklu (22 otáček), poté zváží a změří, pootočí. Kotouč se doplní abrazivem a znovu se těleso zatěžuje za současného broušení. Broušení se ukončí po 16 cyklech, případně zkoušku modifikujeme vzhledem k vlastnostem hmoty a uvádí se odolnost proti obrusu v závislosti na počtu cyklů.

$$A = \Delta V = \frac{\Delta m}{\varphi_R} = \Delta l \cdot 5 \quad [\text{cm}^3 \text{ na } 50 \text{ cm}^2] \quad (27)$$

(A – odolnost proti obrusu pro daný počet cyklů [cm^3 na 50 cm^2]; Δm – průměrný úbytek hmotnosti [g]; φ_R – objemová hmotnost zkušebního tělesa [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]; Δl – průměrný úbytek tloušťky [mm])

9 VALIDACE VLASTNOSTÍ KOMERČNÍCH SMĚSÍ S DATY V TECHNICKÝCH LISTECH

Zvolena byla na trhu dostupná potěrová směs pro výrobu lehčeného cementového potěru třídy CT-C12-F3. Pro doplnění je vyvíjená receptura srovnávána i s nelehčenými cementovými potěrovými směsmi třídy CT-C20-F4, CT-C30-F5 a cementovou potěrovou směsí vyztuženou vlákny třídy CT-C35-F5.

9.1 Vlastnosti srovnávacích směsí

Komerční cementové potěrové směsi obsahují cementové pojivo, přísady pro zlepšení zpracovatelnosti, plnivo v podobě tříděných písků a případné příměsi. Skladba směsi pro výrobu lehčeného cementového potěru je deklarována obdobným složením, je však využito lehčeného plniva v kombinaci s křemičitým pískem. Jednotlivé spotřeby pro aplikace potěru vrstvy 40 mm uvádí tabulka 6.

Tabulka 6: Technické údaje komerčních potěrových hmot.

Třída komerční směsi	Vydatnost [dm ³ .kg ⁻¹]	Spotřeba směsi na tloušťku potěru 40 mm [kg.m ⁻²]	Spotřeba záměsové vody na 30 kg [l]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]
CT-C12-F3	1	40	3,6 - 4,8	1100
CT-C20-F4	0,53	77	3,5 - 4,5	2100
CT-C30-F5	0,53	77	3,5 - 4,5	2100
CT-C35-F5	0,5	80	3,5 - 4,0	2200



Obrázek 22: CT-C35-F5, zbytek na sítu 0,25 mm (foto autor).

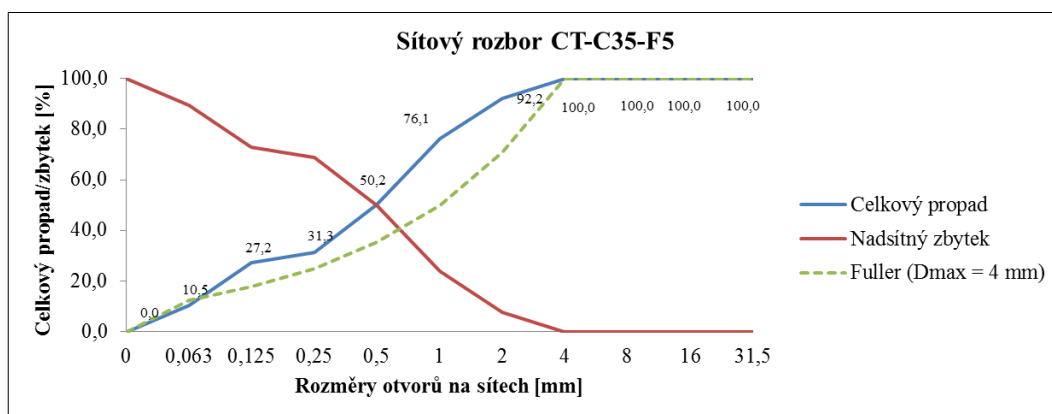


Obrázek 21: CT-C20-F4, suchá směs (foto autor).

Cementový potěr třídy CT-C3-F5 obsahuje skleněná vlákna (Obr. 22) a je vhodný do provozů s vysokým mechanickým namáháním. Cementový potěr značení CT-C20-F4 obsahuje mimo drobné plnivo také polystyrenové kuličky snižující objemovou hmotnost výsledné hmoty (Obr. 21).

9.2 Sítový rozbor komerčních směsí

Jednotlivé komerční směsi byly podrobeny granulometrické analýze v návaznosti na normativní požadavky ČSN EN 933-1 „Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor“. Výsledky jednotlivých granulometrických analýz uvádí níže uvedené grafy 3 až 6 a tabulky 7 až 10.

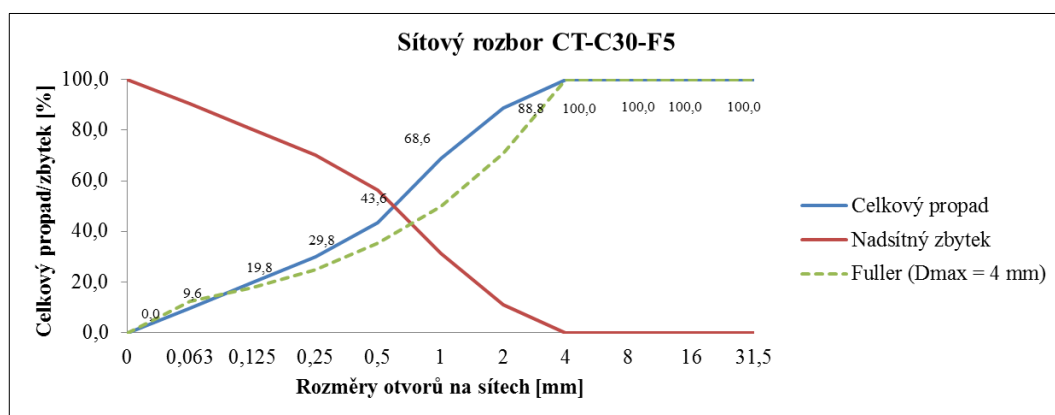


Graf 3: Sítový rozbor komerční potěrové hmoty třídy CT-C35-F5.

Tabulka 7: Sítový rozbor komerční potěrové hmoty třídy CT-C35-F5.

Rozměry otvorů na sítích [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na síti [g]	52,9	83,9	20,8	95,2	130,2	81,0	39,5	0,0	0,0	0,0	0,0	503,5
Váhový zbytek na síti [%]	10,5	16,7	4,1	18,9	25,9	16,1	7,8	0,0	0,0	0,0	0,0	
Nadsítový zbytek [%]	100,0	89,5	72,8	68,7	49,8	23,9	7,8	0,0	0,0	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	10,5	27,2	31,3	50,2	76,1	92,2	100,0	100,0	100,0	100,0	

Komerční potěr třídy CT-C35-F5 se vyznačuje sníženou zrnitostí v oblasti pod 0,25 mm, a to především v oblasti 0,125 – 0,25 mm. Vzhledem k přítomnosti pojiva v sítovém rozboru lze usuzovat na velmi malé množství zrn plniva v podobě filleru.

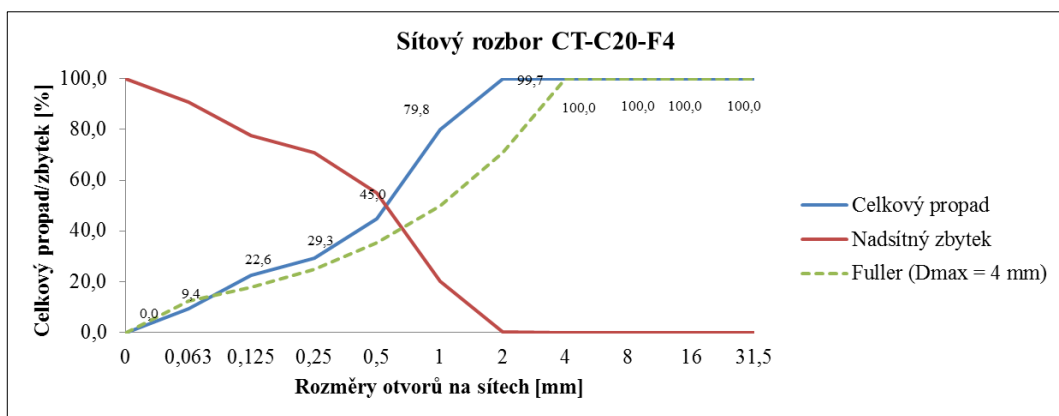


Graf 4: Sítový rozbor komerční potěrové hmoty třídy CT-C30-F5

Tabulka 8: Sítový rozbor komerční potěrové hmoty třídy CT-C30-F5.

Rozměry otvorů na sítích [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na síti [g]	38,7	41,2	40,5	55,6	100,9	81,5	45,0	0,0	0,0	0,0	0,0	403,4
Váhový zbytek na síti [%]	9,6	10,2	10,0	13,8	25,0	20,2	11,2	0,0	0,0	0,0	0,0	
Nadsítový zbytek [%]	100,0	90,4	80,2	70,2	56,4	31,4	11,2	0,0	0,0	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	9,6	19,8	29,8	43,6	68,6	88,8	100,0	100,0	100,0	100,0	

Oproti ostatním komerčním směsím vykazuje směs CT-C30-F5 ideální zrnitost vzhledem ke srovnání s křivkou zrnitosti dle Fullera. U této směsi je patrné snížení obsahu plniva v oblasti pod 0,125 mm.

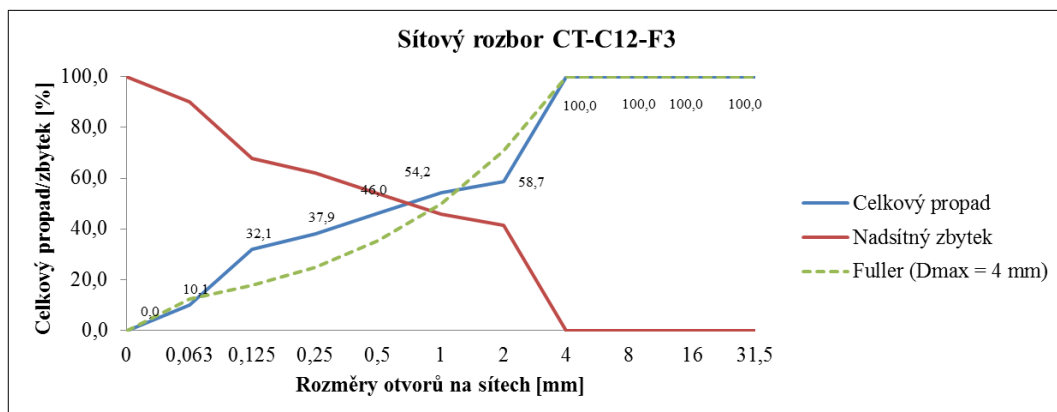


Graf 5: Sítový rozbor komerční potěrové hmoty třídy CT-C20-F4.

Tabulka 9: Sítový rozbor komerční potěrové hmoty třídy CT-C20-F4.

Rozměry otvorů na sítích [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na sítě [g]	44,7	63,0	32,0	74,6	165,9	94,9	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	476,5
Váhový zbytek na sítě [%]	9,4	13,2	6,7	15,7	34,8	19,9	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	
Nadsítový zbytek [%]	100,0	90,6	77,4	70,7	55,0	20,2	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	9,4	22,6	29,3	45,0	79,8	99,7	100,0	100,0	100,0	100,0	

Cementová potěrová směs CT-C20-F4 obsahuje vysoké procento plniva zrnitosti 0,5 – 1 mm a nízký obsah plniva zrnitosti pod 0,125 mm. Obdobně jako u předešlých směsí zde však hraje významnou roli i obsah suché pojivové části. Vzhledem k tomuto faktu je nutné brát zjištěné hodnoty pouze informativně. Uspokojivě však lze odhadnout poměry jednotlivých frakcí plniv mimo plnivo v obsažené ve směsi v podobě filleru.



Graf 6: Sítový rozbor komerční potěrové hmoty třídy CT-C12-F4.

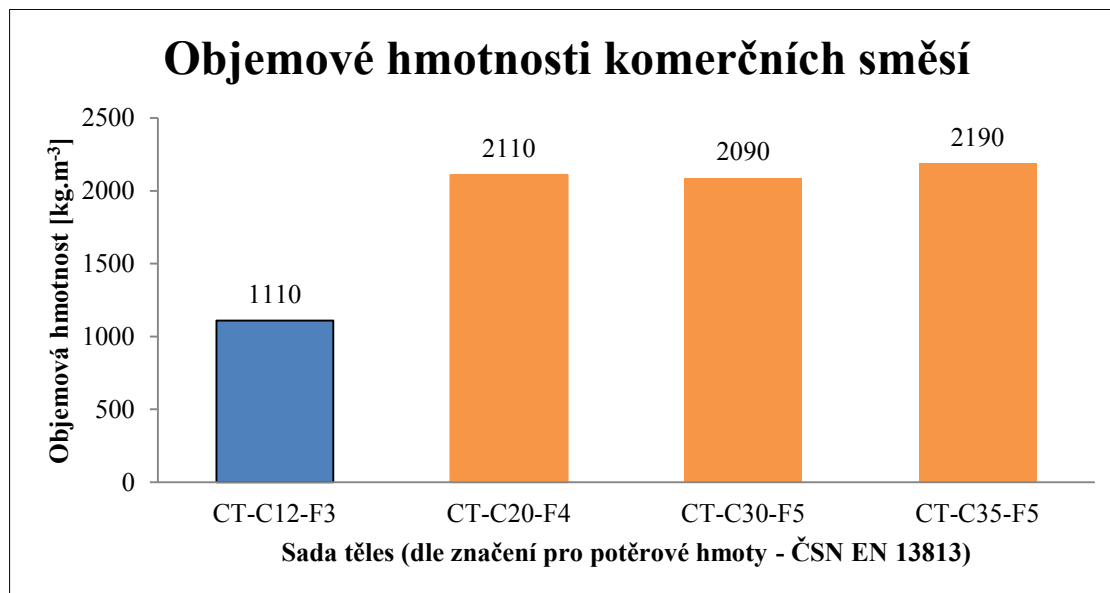
Tabulka 10: Sítový rozbor komerční potěrové hmoty třídy CT-C12-F4.

Rozměry otvorů na sítích [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na síti [g]	51,0	110,8	29,1	41,0	41,3	22,3	208,2	0,0	0,0	0,0	0,0	503,7
Váhový zbytek na síti [%]	10,1	22,0	5,8	8,1	8,2	4,4	41,3	0,0	0,0	0,0	0,0	
Nadsítový zbytek [%]	100,0	89,9	67,9	62,1	54,0	45,8	41,3	0,0	0,0	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	10,1	32,1	37,9	46,0	54,2	58,7	100,0	100,0	100,0	100,0	

Lehčená potěrová komerční směs s obsahem kameniva Liapor vykazuje oproti předchozím směsím zcela odlišnou zrnitost. Křivka zrnitosti je závislá především na hmotnosti užitého plniva, kdy dochází k částečným rozdílům mezi plnivem hutným a lehčeným. Křivka zrnitosti komerční směsi pro přípravu lehčeného potěru je však závislá především na vysokém obsahu hrubého plniva zrnitosti 0,063 až 0,25 mm a dále vysokém obsahu lehčeného plniva zrnitosti 2 až 4 mm.

9.3 Stanovení objemové hmotnosti

Stanovení objemové hmotnosti proběhlo na trámcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm připravených pro zkoušku pevnosti v tahu za ohybu. Měření proběhlo v souladu s požadavky ČSN EN 13892 „Zkušební metody potěrových materiálů“.



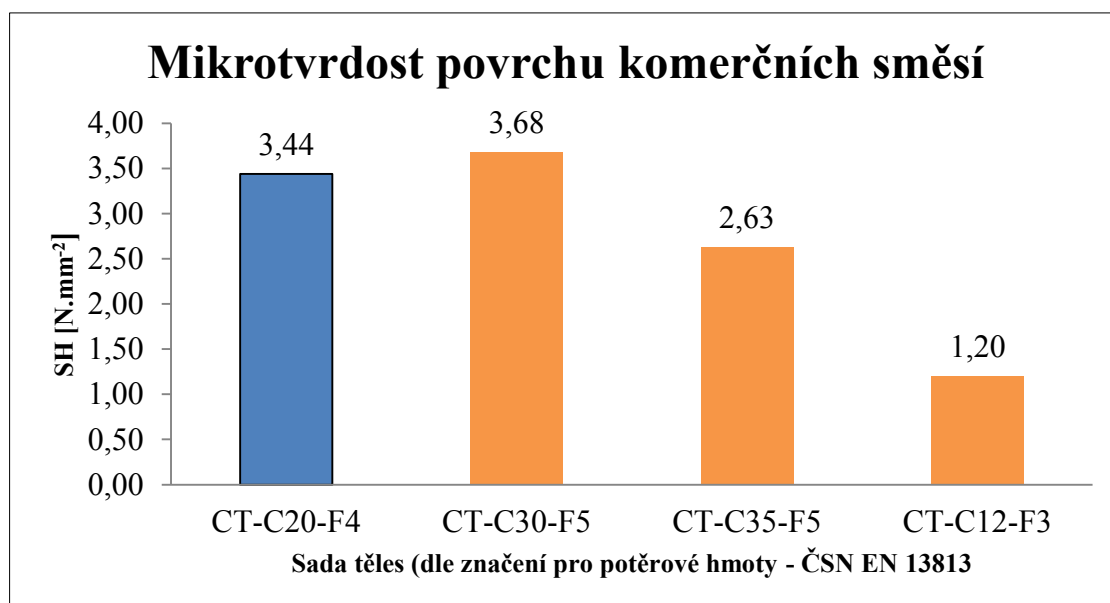
Graf 7: Objemová hmotnost komerčních potěrových hmot.

Objemová hmotnost lehčeného potěru třídy CT-C12-F3 je snížena vysokým obsahem kameniva Liapor (Graf 7). Při srovnání ostatních komerčních potěrů si můžeme

všimnout nižší objemové hmotnosti potěru CT-C30-F5 obohaceného lehčeným plnivem. Vzhledem k velmi malému množství lehčeného plniva ve směsi CT-C30-F5 však nelze usuzovat na snížení objemové hmotnosti právě užitým plnivem.

9.4 Stanovení mikrotvrlosti povrchu

Stanovení povrchové tvrdosti proběhlo v souladu s požadavky ČSN EN 13892-6 „Zkušební metody potěrových materiálů - Část 6: Stanovení tvrdosti povrchu“. Pro zkušební metodu bylo využito Höpplerova konzistometru.



Graf 8: Mikrotvrdot povrchu komerčních potěrových hmot.

Určení celkové povrchové tvrdosti je problematické především u hmot s obsahem lehčeného plniva, kde jsou výsledky ovlivněny především obsahem cementového tmele a zároveň tvrdostí samotného lehčeného plniva. Nízká povrchová pevnost hmoty třídy CT-C35-F5 je ovlivněna jak granulometrií směsi CT-C35-F5, tak i tvarem převládajících drcených zrn plniva obsaženého ve směsi (Graf 8).

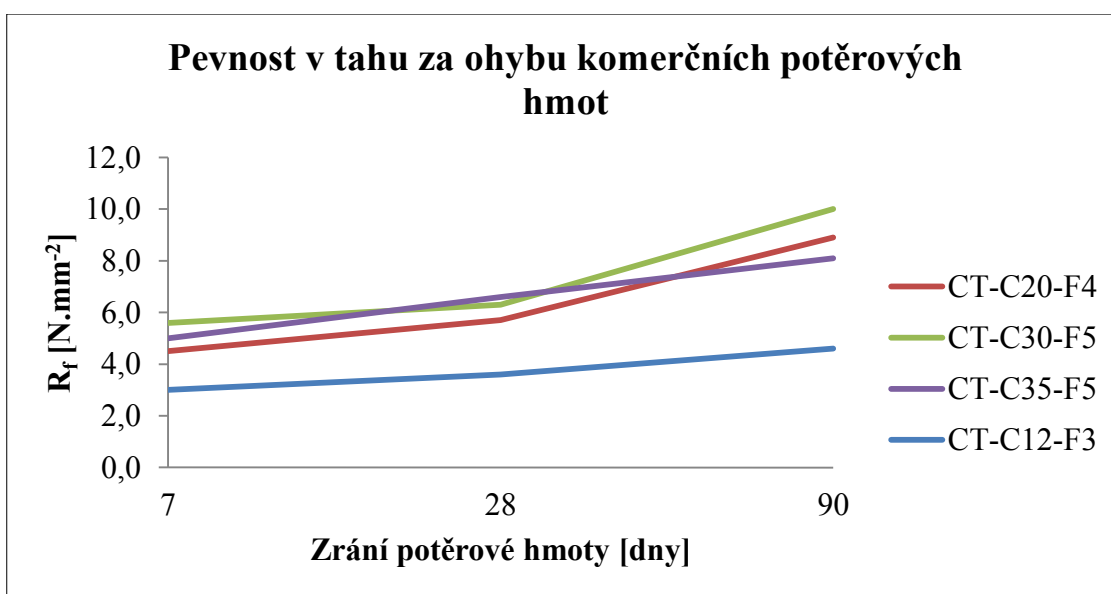
9.5 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku

Pevnost v tahu za ohybu byla zkoušena na trámcích 40 x 40 x 160 mm v 7. a dále v 28. dnu zrání. Pro zkoušky pevnosti v tlaku bylo využito úlomků těles ze zkoušky pevnosti v tahu za ohybu. Laboratorní ošetření vzorků před zkouškou a samotné

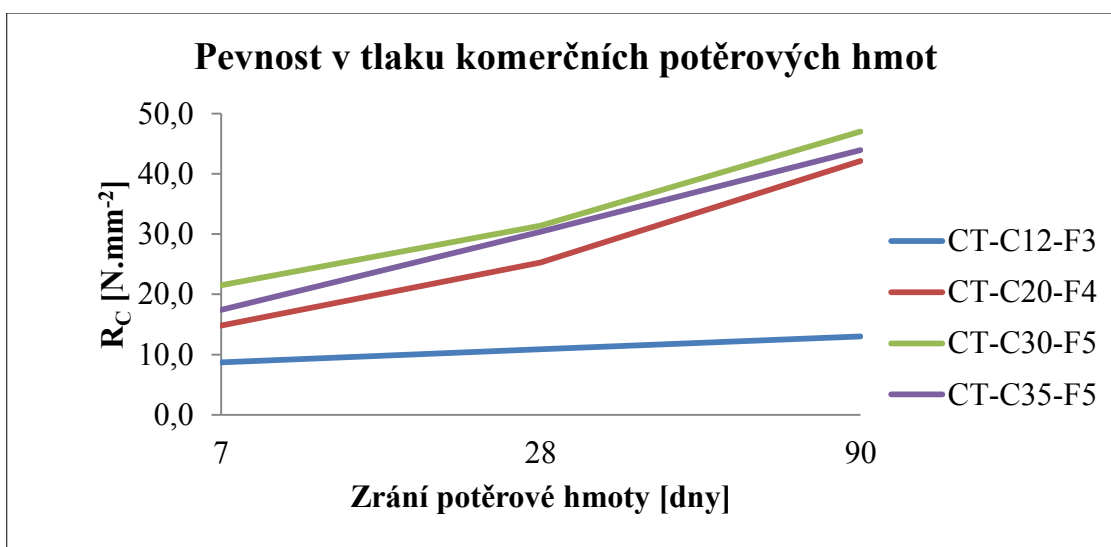
zkoušky proběhly v souladu s požadavky ČSN EN 13892 „Zkušební metody potěrových materiálů“.

Lehčená potěrová hmota třídy CT-C12-F3 dosahovala své deklarované pevnosti v tahu za ohybu již sedmý den zrání. Oproti pevnosti v tahu za ohybu vykazovala lehčená potěrová hmota třídy CT-C12-F3 snížené počáteční pevnosti v tlaku (Graf 9, 10).

Nelehčené potěrové hmoty vykazovaly obdobné nárůsty pevností ve srovnání s lehčenou potěrovou hmotou. Pozdní vývin pevností může být ovlivněn přidavkem pucolánů, přičemž lze sledovat vysoký nárůst pevností až do 90 dne zrání.



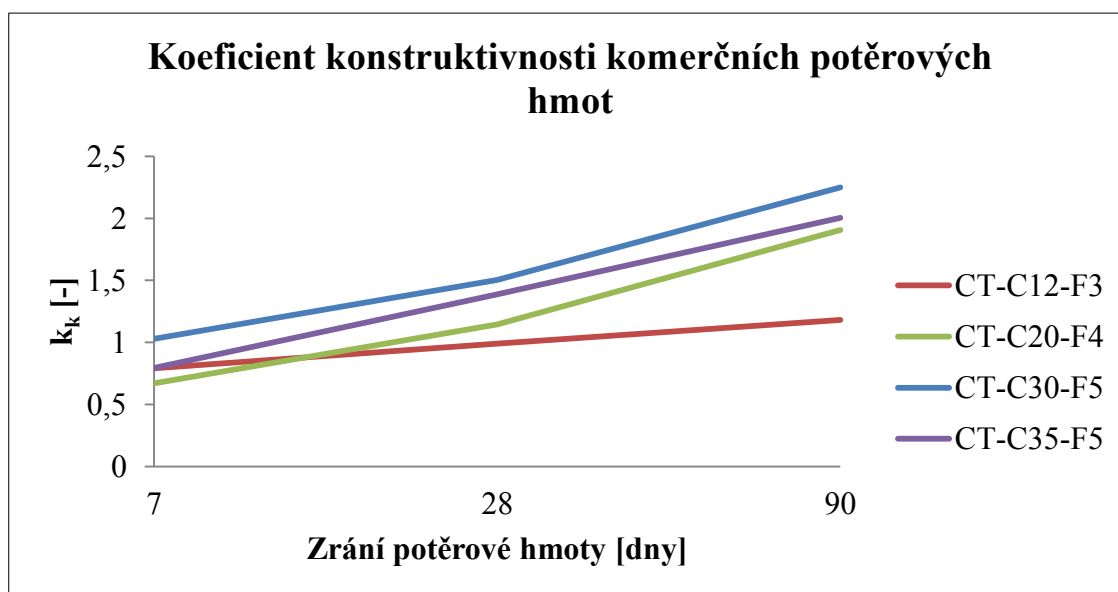
Graf 9: Srovnání pevností v tahu za ohybu komerčních potěrových hmot.



Graf 10: Srovnání pevností v tlaku komerčních potěrových hmot.

9.6 Stanovení konstruktivnosti komerčních hmot

Na základě výsledků měření objemové hmotnosti a zároveň výsledků destruktivních zkoušek potěrové hmoty byl pro jednotlivé vzorky komerčních potěrů vypočten koeficient konstruktivnosti. Vzhledem k opožděnému vývinu pevností se nízký součinitel během zrání až zdvojnásobil, jmenovitě lehčený potěr třídy CT-C12-F3 z 0,78 v 7. dnu zrání na 1,17 v 90 dnu zrání. Komerční potěr CT-20-F4 z 0,70 v 7. dnu zrání na 2,00 v 90. dnu zrání, potěr CT-C30-F5 z 1,03 v 7. dnu zrání na 2,25 a potěr třídy CT-C35-F5 z 0,79 v 7. dnu zrání na 2,00 v 90. dnu zrání (Graf 11).



Graf 11: Srovnání konstruktivnosti komerčních potěrových hmot.

9.7 Stanovení tepelné vodivosti komerčních hmot

Pro zkoušky tepelné vodivosti byly připraveny sady vzorků 100 x 100 x 200 mm. Stanovení probíhalo na základě požadavku ČSN EN 993-14 „Zkušební metody pro žárovzdorné výrobky tvarové hutné - Část 14: Stanovení tepelné vodivosti metodou topného drátu (křížové uspořádání)“.

Tabulka 11: Výsledky měření součinitele tepelné vodivosti komerčních potěrových hmot.

Třída potěrové hmoty	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
CT-C12-F3	0,43
CT-C20-F4	1,09
CT-C30-F5	1,27
CT-C35-F5	1,14

Z výsledků (Tab. 11) je patrné rapidní snížení součinitele tepelné vodivosti vlivem lehčených plniv a zároveň mezerovitostí komerční hmoty CT-C12-F3.

10 VÝBĚR VHODNÝCH PLNIV

Výběr vhodných plniv využitelných jakožto náhrada původního plniva (sklářský písek) probíhal na základě průzkumu trhu s plnivy využívaných či využitelných ve stavebních hmotách, a to především s přihlédnutím na využití lehčených plniv vyráběných z odpadních látek.

10.1 Lehčená plniva

Vzhledem k požadavku na vylehčení potěrové hmoty byla primárně volena lehčená plniva.

Lehčená plniva dostupná z přírodních zdrojů – plniva neupravovaná

K přírodním lehčeným plnivům využitelným ve stavebnictví řadíme především přírodní pemzu a veškeré lehčené lávy, tufy a tufity, diatomity, pórovitý travertin aj.

Lehčená plniva uměle vyráběná z přírodních zdrojů

Část přírodních zdrojů je schopná expandace za zvýšené teploty a tím vytváří plnivo o nízké objemové hmotnosti. Mezi tyto přírodní materiály řadíme především perlit, obsidián, vermikulit, expandovatelné jíly a břidlice (anglické lehčené plnivo LECA a LESA, kamenivo Liapor) či expandovatelný křemičitý písek (lehčené plnivo SioPor).

Lehčená plniva z odpadních látek – plniva neupravovaná

Mezi odpadní látky využitelné v podobě lehčených plniv řadíme jak odpadní látky z různých průmyslových odvětví, tak odpadní látky z výroby lehčených plniv a hmot. Řadíme sem odpadní strusku, případně škváru, o nízké objemové hmotnosti, dále nejrůznější typy recyklátů v podobě kameniv z dřívější zástavby (betonový, cihelný a pórobetonový recyklát), případně odpad ze zpracování stavebních hmot (sklopěnový, polystyrenový, polyuretanový či čedičový odpad). K dalším plnivům o nízké objemové hmotnosti z řad odpadních látek řadíme piliny, pazdeří, korek a obdobné organické odpady.

Lehčená plniva uměle vyráběná z odpadních látek

Základními odpady využívanými v dnešní výrobě lehčených plniv jsou struska, popeloviny a odpadní sklo, a to především k pořizovacím nákladům na jednotlivé vstupy. Expandovaná struska v podobě struskového plniva je dodávána v podobě amerického kameniva Litex, případně finského kamenniva OKTO. Popeloviny v podobě úletového popílku se využívají při výrobě kameniva Agloporit, polského kameniva Lytag (dále Čína a Holandsko), amerického vysoce porézního kameniva Flashag či sbalků za studena z popílku a dalších komponent vyráběného kameniva Aardelite (Holandsko), Rugen a Fomapor (ČR), případně lze uvést lehčené kamenivo Carbolite (Holandsko).

Novým trendem ve výrobě lehčených plniv je využití odpadního skla. Na trhu jsou dostupná plniva s tvarem kulových zrn (Liaver a Poraver – Německo) a dále celá škála drcených pelet expandovaného skla (Hasopor – Norsko, Refaglass a Geocell – ČR, Technopor – Německo).

Úpravou popílku plavením a další úpravou (know-how výrobce) lze získat velmi lehké plnivo o vysokém obsahu jemných kulovitých částic, převážně dutých, případně s vnitřní porézní strukturou. Tento typ lehčeného plniva je dostupný především v zahraničí.

10.2 Požadavky na lehčená plniva využitelná v potěrové hmotě

Základním požadavkem na potěrovou hmotu byla především požární bezpečnost, dále byla vzhledem ke kročejové neprůzvučnosti a tepelným ztrátám konstrukce řešena i objemová hmotnost potěrové hmoty. Dále byly uvažovány i pevnostní charakteristiky a celková konstruktivnost hmoty. Potěrové hmoty jsou ve srovnání s klasickým betonem definovány především nulovým obsahem hrubé frakce plniva, tudíž bylo pohlíženo i na zrnitost jednotlivých dostupných plniv, případně na možnost úpravy zrnitosti drcením. Primární však zůstává dostupnost vybíraných plniv, a to především k možnostem výzkumu vlastností jednotlivých komponent. Opomíjeny však nebyly ani celkové vlastnosti plniv (nasákavost, obsah cizorodých látek, toxicita a především vlhkost při dodání) s ohledem na celkovou trvanlivost potěrové hmoty.

10.3 Výběr plniv

Při výběru byly vynechány organické materiály s nízkou tepelnou odolností, s obsahem škodlivých látek a především na trhu nedostupná plniva.

Výběrovým kritériím nejvíce vyhovovalo kamenivo Liapor, a to především k jeho dostupnosti a dále procentu využití v dnešní zástavbě. Dále byl expandovaný perlit s přihlédnutím na zhoršení zpracovatelnosti směsi a s přihlédnutím k vysoké nasákavosti, ale zároveň i vysokému využití ve stavebnictví. Ze stejného důvodu bylo vybráno i plnivo vermikulit (expandovaný vermikulit), a to v návaznosti na dřívější využití tohoto plniva. Vzhledem k využití odpadních látek bylo preferováno pěnové sklo Geocell, u kterého je však nutné počítat s úpravou zrnitosti. Bez úpravy zrnitosti lze využít skleněného recyklátu v podobě kameniva Poraver. Využito bylo také možnosti úpravy vlastností potěrové hmoty mikrosférami, tj. separovaným a upravovaným popílkem značky Q-CEL-7014 a Omega-SPHERES W300.

10.4 Zhodnocení výběru plniv

Vybíraná plniva byla preferována především z ekonomicko–technického hlediska. Upřednostňována byla plniva vyráběná z odpadních látek. Na základě požadavků uvedených v kapitole 10.2 byla preferována plniva mikrosférická (tzv. mikrosféry) a dále kamenivo Liapor, expandovaný perlit, vermikulit, pěnová skla Geocell a Poraver. Prioritně bylo vylehčení potěrové hmoty řešeno mikrosférami, kamenivem Liapor a pěnovým sklem Geocell. Sekundárně byla řešena částečná náhrada expandovaným perlitem a vermikulitem a zároveň vhodným typem mikrosfér.

11 VLASTNOSTI PLNIV

U jednotlivých plniv byly validovány základní charakteristiky uváděné v technických listech, případně byly doplněny potřebnými údaji.

11.1 Granulometrický rozbor

Jednotlivá plniva byla podrobena granulometrické analýze v návaznosti na normativní požadavky ČSN EN 933-1 „Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor“.

Jednotlivé výstupy granulometrických analýz zkoušených plniv jsou součástí přílohy A. Pěnové sklo Geocell bylo podrobeno mechanické úpravě na frakci pod 4 mm s použitím čelistového drtiče. Ve zbytku se jedná především o sypké partikulární látky (skupenství tuhé).

11.2 Základní fyzikálně-mechanické vlastnosti vybraných plniv

U jednotlivých vybraných lehčených plniv vyráběných z přírodních a odpadních látek byla zkoušena především nasákavost a odolnost proti drcení. Pevnostní charakteristika byla dále doplněna o sypnou hmotnost volně sypané suroviny, součinitel tepelné vodivosti, teplotu tání, pH výluhu a barevný odstín dané suroviny (Tab. 12).

Tabulka 12: Základní vlastnosti vybraných plniv.

Plnivo	pH	Sypná hmotnost [kg.m ⁻³]	Odolnost proti drcení [N.mm ⁻²]	Nasákavost [%]	Teplota tání [°C]	Součinitel tepelné vodivosti [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Barva
Liapor	5,5 - 11	450 - 600	2,1 - 4,2	5 - 15	1350	0,09	Hnědá
Poraver	9 - 12	270	1 - 6	10 - 50	900	0,07	Bílá
Geocell	7,0 - 7,3	150	0,2	10	900	0,04 - 0,08	Šedá
Expandovaný perlit	7,1	90	0,2 - 0,3	250 - 500	980 - 1260	0,04 - 0,06	Hnědobílá
Expandovaný vermikulit	8,5 - 10	180	0,1 - 0,2	465	1350	0,04 - 0,06	Zlatohnědá

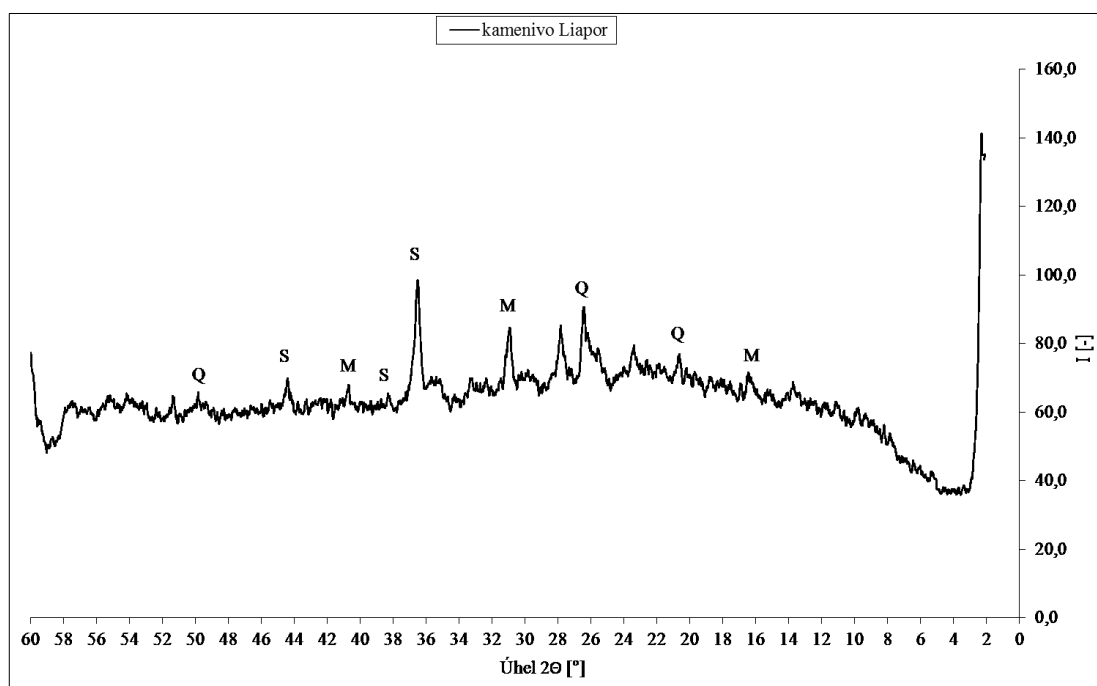
V případě cenosfér Omega-SPHERES W300 a cenosfér Q-CEL-7014 byl zaznamenán barevný odstín, dále pH výluhu, sypná hmotnost volně sypaných cenosfér, odolnost proti drcení a teplota tání (Tab. 13).

Tabulka 13: Základní vlastnosti vybraných mikrosfér.

Mikrosféry	pH	Sypná hmotnost [kg.m ⁻³]	Odolnost proti drcení [N.mm ⁻²]	Teplota tání [°C]	Barva
Omega-SPHERES W300	7 - 9,9	400	3,5	1200 - 1600	Šedobílá
Q-CEL-7014	7,9	80	0,2	350	Bílá

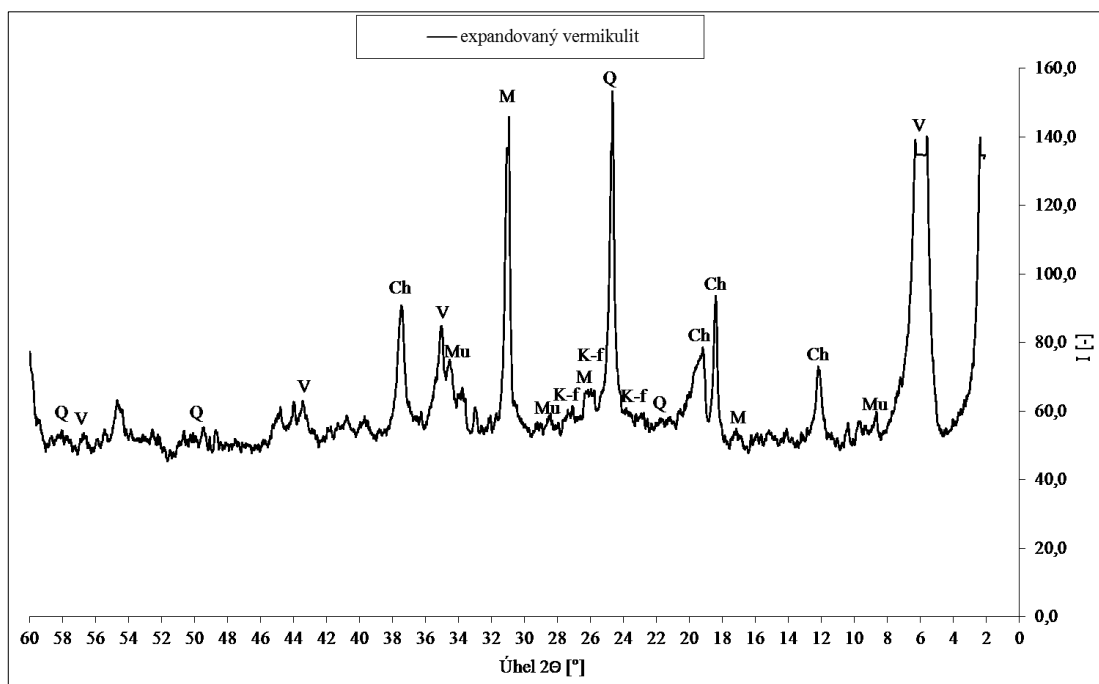
11.3 Difraktoметриcký rozbor plniv

Vybraná plniva byla dále podrobena RTG difrakční analýze z důvodu zjištění zastoupení jednotlivých minerálů. Výsledky difraktoметриcké analýzy jsou pouze orientační (Graf 12 až 16).



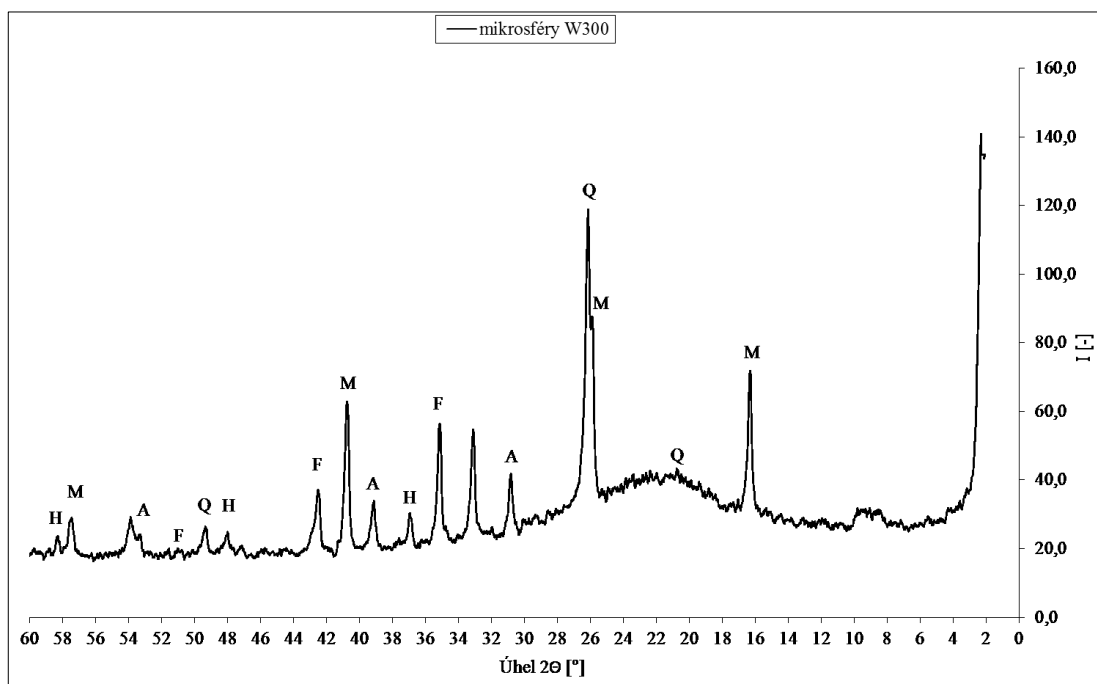
Graf 12: Difraktoметриcký rozbor kameniva Liapor.

Difraktoметриe keramického kameniva Liapor vyráběného z jílu obsahujících kaolinit, illit, křemík a slídy. Nalezeno: **Křemík (Q)**, **Mullit (M)**, **Spinel (S)**. Předpokládán je obsah metakaolinitu.



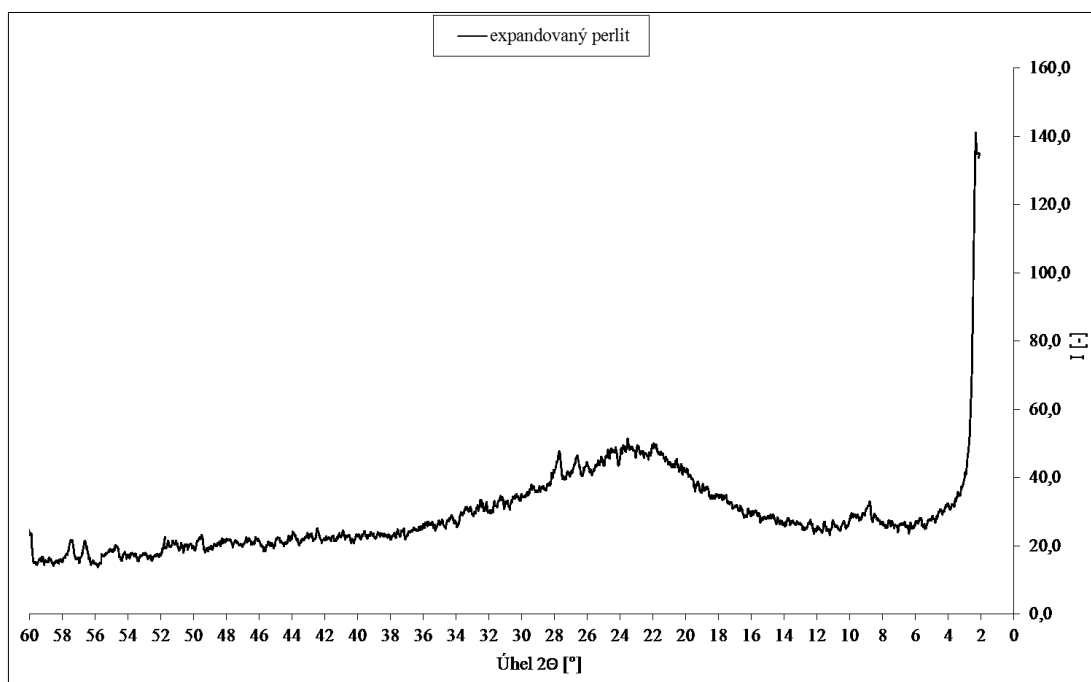
Graf 13: Difraktometrický rozbor expandovaného vermikulitu.

Difraktometrie expandovaného vermikulitu. Nalezeno: **Křemen** (Q; SiO_2), **Vermikulit** (V; $(\text{Mg}_5 \text{Fe}^{+2}_{0.2} \text{Fe}^{+3}_{0.8}) [\text{Si}_{5.5} \text{Al}_{2.5} \text{O}_{20}] (\text{OH})_4$), **Muskovit** (Mu; $(\text{K}, \text{Na})\text{Al}_2[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}](\text{OH})_2$), **Mullit** (M; $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), **K-živec** (K-f, KAlSi_3O_8), Chlorit (Ch).

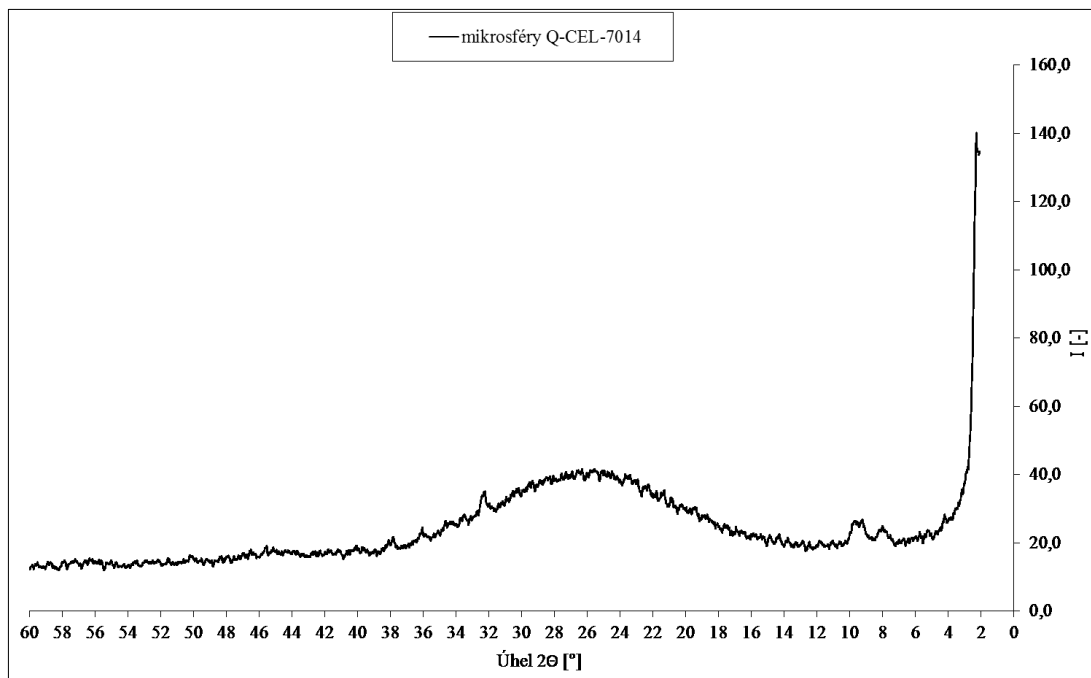


Graf 14: Difraktometrický rozbor mikrosfér Omega-SPHERES W300

Difraktometrie mikrosfér Omega-SPHERES W300. Nalezeno: **Křemen (Q)**, **Mullit (M)**, **Hematit (H)**, **Magnetit (F)**, **Anhydrit (A)**, vysoký podíl amorfního oxidu křemičitého.



Graf 15: Difraktometrický rozbor expandovaného perlitu.



Graf 16: Difraktometrický rozbor mikrosfér Q-CEL-7014.

Difraktometrie mikrosfér Q-CEL-7014 a expandovaného přírodního perlitu vykazuje především vysoký podíl amorfního oxidu křemičitého.

12 VLIV LEHČENÝCH PLNIV NA VÝSLEDNÉ VLASTNOSTI POTĚROVÉ HMOTY

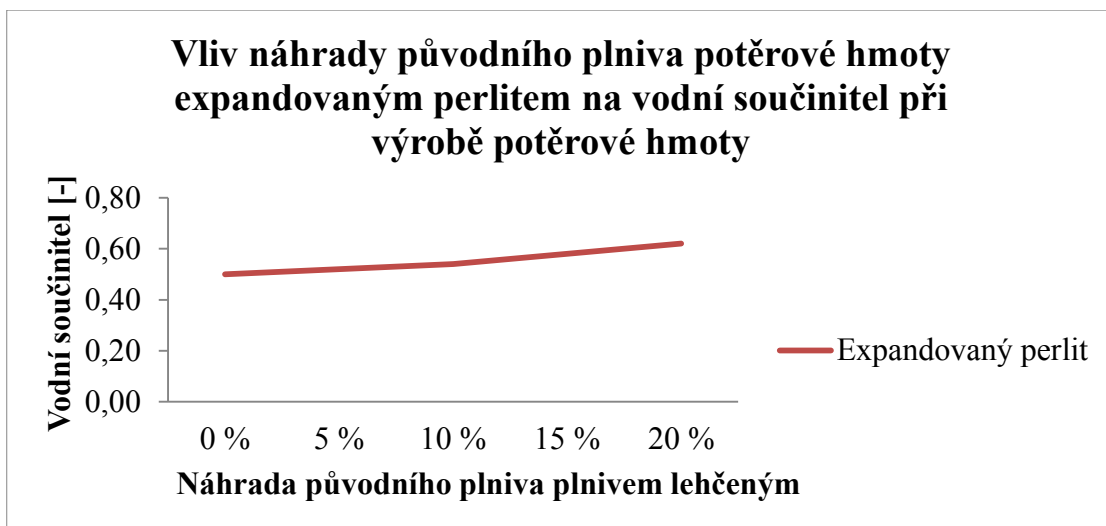
Lehčená plniva z vyráběná expandací perlitu, vermikulitu, případně plavením popílku dosahují nejen nízkých objemových hmotností, ale zároveň i nízkých pevnostních charakteristik. Cílem této etapy bylo především zjištění vhodného zastoupení původního plniva plnivem lehčeným. Prioritně byl zkoumán vliv 5%, 10%, 15% a 20% náhrady původního plniva plnivem lehčeným. Náhrada plniva referenční směsi (plnivo k pojivu v poměru 3:1, bez náhrady lehčeným plnivem) probíhala objemově.

12.1 Vliv expandovaného perlitu na fyzikálně-mechanické vlastnosti potěrové hmoty

Referenční receptura pro vzorky s náhradou plniva expandovaným perlitem obsahuje plnivo v podobě přírodního drobného plniva zrnitosti 0-4 mm (granulometrie - viz příloha A).

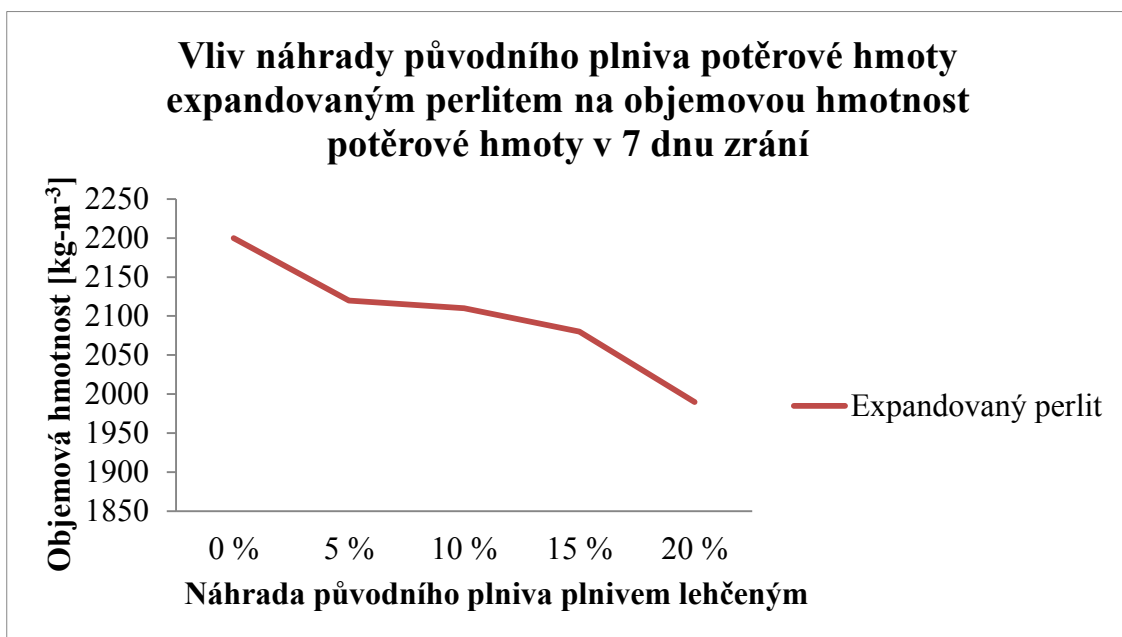
Vzhledem k plynulé křivce zrnitosti přírodního kameniva frakce 0-4 mm se jeví jako vhodné provést náhradu lehčeným plnivem v plynulé křivce zrnitosti. Pro výpočet mísení jednotlivých typů expandovaného perlitu bylo využito softwarové aplikace. Dále došlo k posouzení grafického výstupu a k porovnání s požadovanou křivkou zrnitosti. Ideální křivka zrnitosti je při smísení expandovaných kameniv EP 180 (54 %), EP 150 (13 %) a EP 100 (33 %).

Pro objemovou náhradu plniva je nutné znát sypanou hmotnost v setřeseném stavu původního plniva a zároveň sypanou hmotnost v setřeseném stavu plniva lehčeného, případně směsi lehčených plniv. Sypaná hmotnost v setřeseném stavu směsi frakcí expandovaného perlitu činila 155 kg.m^{-3} , u přírodního plniva frakce 0-4 mm byla zjištěna sypaná hmotnost v setřeseném stavu 1626 kg.m^{-3} . Náhrada probíhala procentuálně 5 %, 10 %, 15 % a 20 % objemově.

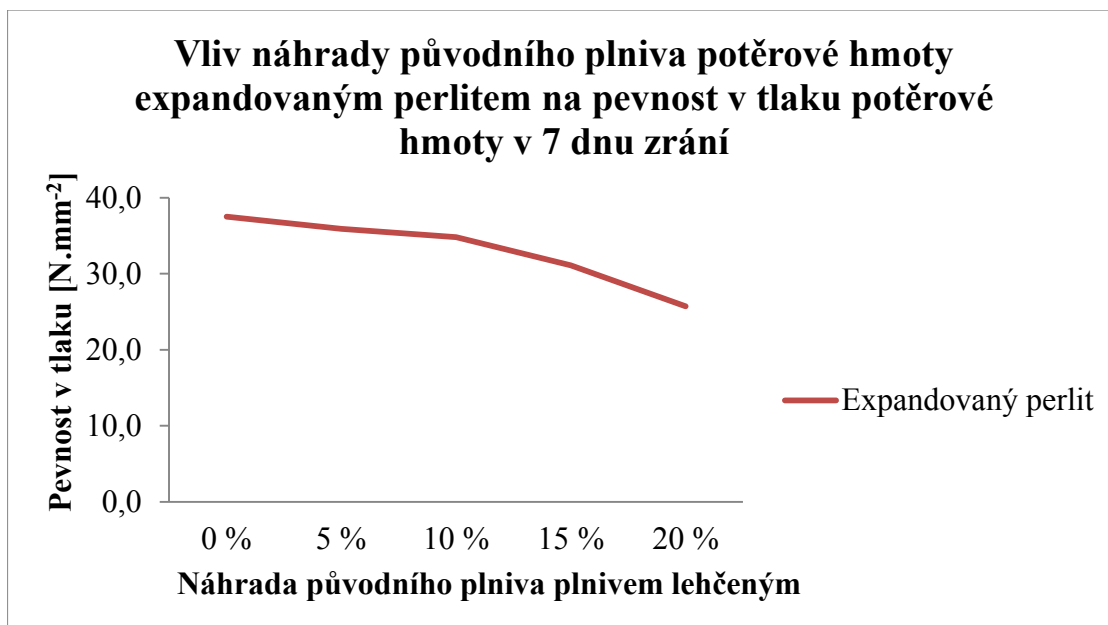


Graf 17: Vodní součinitel potěrové hmoty - průzkum vlivu náhrady plniva expandovaným perlitem.

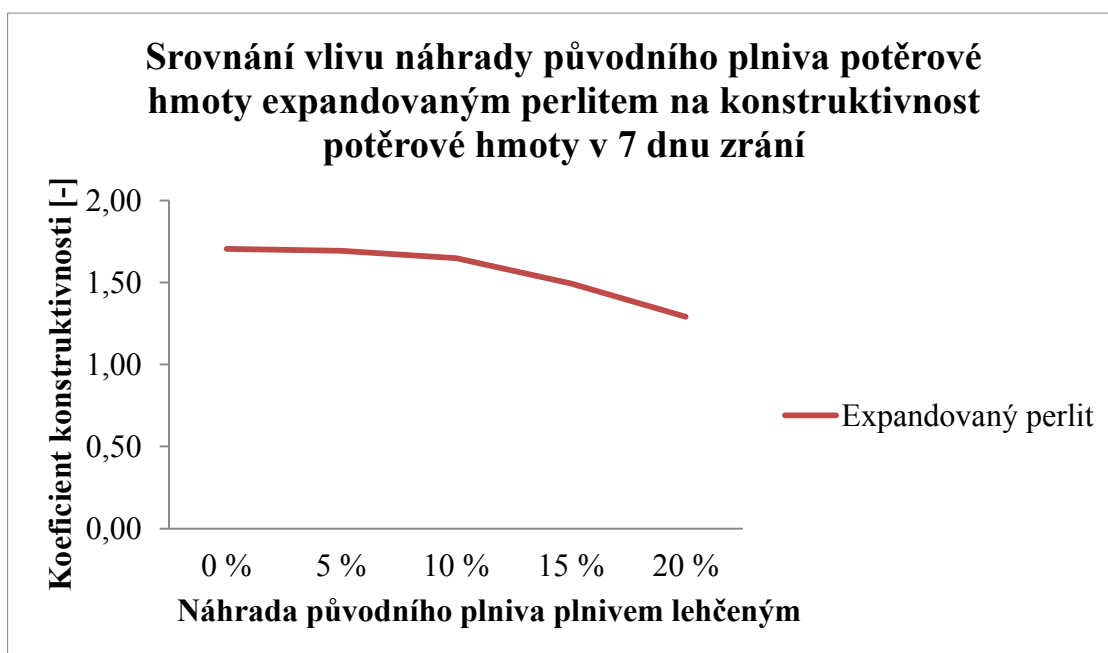
Vzorky byly ponechány v laboratorním uložení (20 ± 2 °C, 65 ± 5 % relativní vlhkosti) po dobu 7 dnů pro pevnostní zkoušky.



Graf 18: Objemová hmotnost potěrové hmoty - průzkum vlivu náhrady přírodního plniva expandovaným perlitem.



Graf 19: Pevnost v tlaku potěrové hmoty - průzkum vlivu náhrady plniva expandovaným perlitem.



Graf 20: Koeficient konstruktivnosti potěrové hmoty - průzkum vlivu náhrady plniva expandovaným perlitem.

Zhodnocení vlivu expandovaného perlitu

Vlivem nasákavosti perlitového kameniva je nutno přidávat vyšší množství záměsové vody, tak aby byla směs zpracovatelná a vykazovala konzistenci na úrovni srovnávací směsi. Přídavkem expandovaného perlitu snižujeme nejen objemovou hmotnost zatvrdlé hmoty, ale zároveň snižujeme i celkovou odolnost hmoty proti působení vnějších sil. Přídavkem expandovaného perlitu tedy zároveň snižujeme i

koeficient konstruktivnosti hmoty. Při porovnání hodnot množství záměsové vody a hodnot koeficientu konstruktivnosti lze volit pouze 10% náhradu přírodního kameniva expandovaným perlitem.

Expandovaný perlit je tudíž vhodné využít do 10 % v podobě náhrady původního plniva u jednotlivých receptur, především tam, kde je síťovým rozbořem určen pouze malý podíl jemného plniva, případně jedná-li se u využívaného lehčeného plniva o přerušovanou křivku zrnitosti.

12.2 Vliv expandovaného vermikulitu a mikrosfér Q-CEL-7014, Omega-SPHERES W300 na fyzikálně-mechanické vlastnosti potěrové hmoty

Expandovaný vermikulit

Vzhledem k využití sklářského písku v podobě plniva nově vznikajícího kompozitu bylo zvoleno toto plnivo i pro zkoušky vlivu procentuální náhrady plniva plnivem lehčeným v podobě expandovaného vermikulitu a lehkých popelovin. Granulometrie sklářského písku je součástí přílohy A.

Vzhledem ke granulometrii sklářského písku byl volen typ lehčeného kameniva Vermikulit Superfine (viz příloha A). Vermikulit je v dnešní době na trhu dostupný v podobě typů Vermikulit Large (převážně frakce 4-8 mm), Vermikulit Medium (převážně frakce 2-4 mm), Vermikulit Superfine (převážně frakce 0,5-1 mm) a Vermikulit Micron (převážně frakce 0,25-0,5 mm). Viz příloha A.

Sypná hmotnost v setřeseném stavu expandovaného vermikulitu typu Vermikulit Superfine činila 213 kg.m^{-3} , u sklářského písku byla zjištěna sypná hmotnost v setřeseném stavu $1\,610 \text{ kg.m}^{-3}$. Náhrada probíhala procentuálně po 5 %, 10 %, 15 % a 20 % objemově.

Mikrosféry Q-CEL-7014

Mikrosféry Q-CEL-7014 se vyznačují velmi nízkou objemovou hmotností v setřeseném stavu (62 kg.m^{-3}). Výroba mikrosfér Q-CEL-7014 je součástí know-how výrobce. Lze však uvést, že mikrosféry Q-CEL-7014 jsou kulové částice čistě bílé barvy. Pro mikrosféry Q-CEL-7014 je typické jejich problematické zpracování

vzhledem k samovolnému shlukování částic. Shluky částic je nutné během homogenizace komponent dispergovat v celém objemu suché výrobní směsi. Při nedostatečné dispergaci kulových částic mikrosfér Q-CEL-7014 v potěrové hmotě dochází ke vzniku nechtěných shluků silně ovlivňujících zpracovatelnost a fyzikálně-mechanické vlastnosti zatvrdlé potěrové hmoty.

V případě náhrady původního plniva mikrosférami Q-CEL-7014 bylo využito plnivo v podobě sklářského písku.

Náhrada sklářského písku plnivem v podobě plaveného popílku Q-CEL-7014 probíhala procentuálně po 5 %, 10 %, 15 % a 20 % objemově.

Vodní součinitel 0,77 (pro referenční směs) byl zvyšován na základě zkoušek konzistence prováděných na střešacím stolku s přihlédnutím na ČSN EN 1015-3 „*Zkušební metody malt pro zdivo - Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)*“. V případě vyhovující konzistence byla pro každou procentuální náhradu plniva plnivem lehčeným zhotovena trojdílná sada těles 40 x 40 x 160 mm pro zhodnocení vlivu vodního součinitele a lehčeného plniva na konstruktivnost materiálu.

Mikrosféry Omega-SPHERES W300

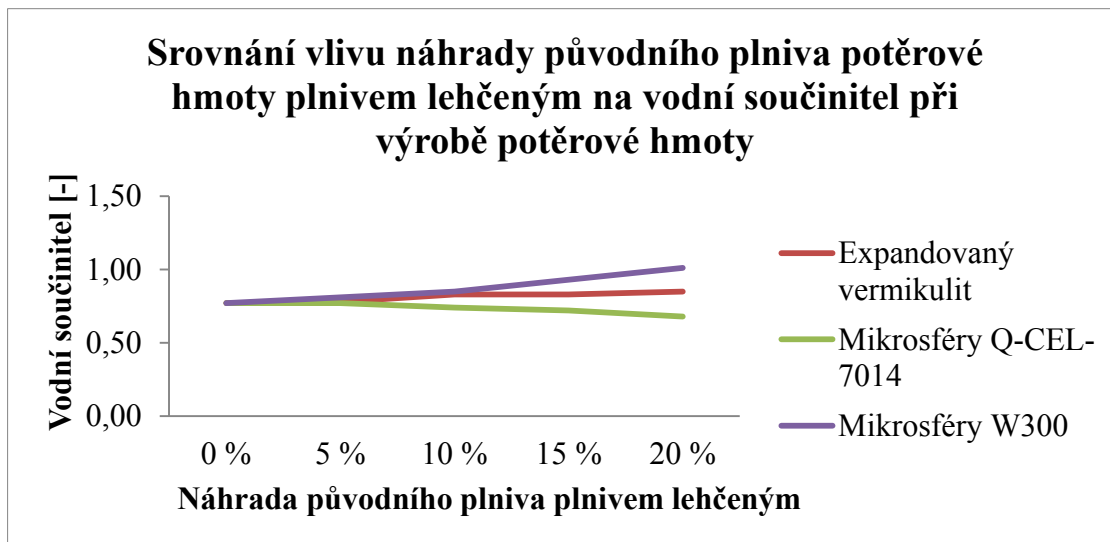
Mikrosféry Omega-SPHERES W300 (dále jen W300) jsou typem plaveného separovaného popílku barvy šedé až šedobílé. Synná hmotnost mikrosfér W300 v setřeseném stavu činí 456 kg.m^{-3} . Mikroplnivo v podobě mikrosfér W300 vyniká nejen svou nízkou objemovou hmotností, ale především také ztekucujícím účinkem na směs pro výrobu potěrové hmoty.

Náhrada sklářského písku plnivem v podobě plaveného popílku W300 probíhala procentuálně po 5 %, 10 %, 15 % a 20 % objemově.

Vodní součinitel 0,77 (pro referenční směs) byl zvyšován na základě zkoušek konzistence prováděných na střešacím stolku s přihlédnutím na ČSN EN 1015-3 „*Zkušební metody malt pro zdivo - Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)*“. V případě vyhovující konzistence byla pro každou procentuální náhradu plniva plnivem lehčeným zhotovena trojdílná sada těles 40 x 40 x 160 mm pro zhodnocení vlivu vodního součinitele a lehčeného plniva na konstruktivnost materiálu.

Vliv přidavku expandovaného vermikulitu a mikrosfér na vodní součinitel

Vodní součinitel 0,5 (pro referenční směs) byl zvyšován na základě zkoušek konzistence prováděných na střešacím stolku s přihlédnutím na ČSN EN 1015-3 „Zkušební metody malt pro zdivo - Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)“. V případě vyhovující konzistence byla pro každou procentuální náhradu plniva plnivem lehčeným zhotovena trojdílná sada těles 40 x 40 x 160 mm pro zhodnocení vlivu vodního součinitele a lehčeného plniva na konstruktivnost materiálů.

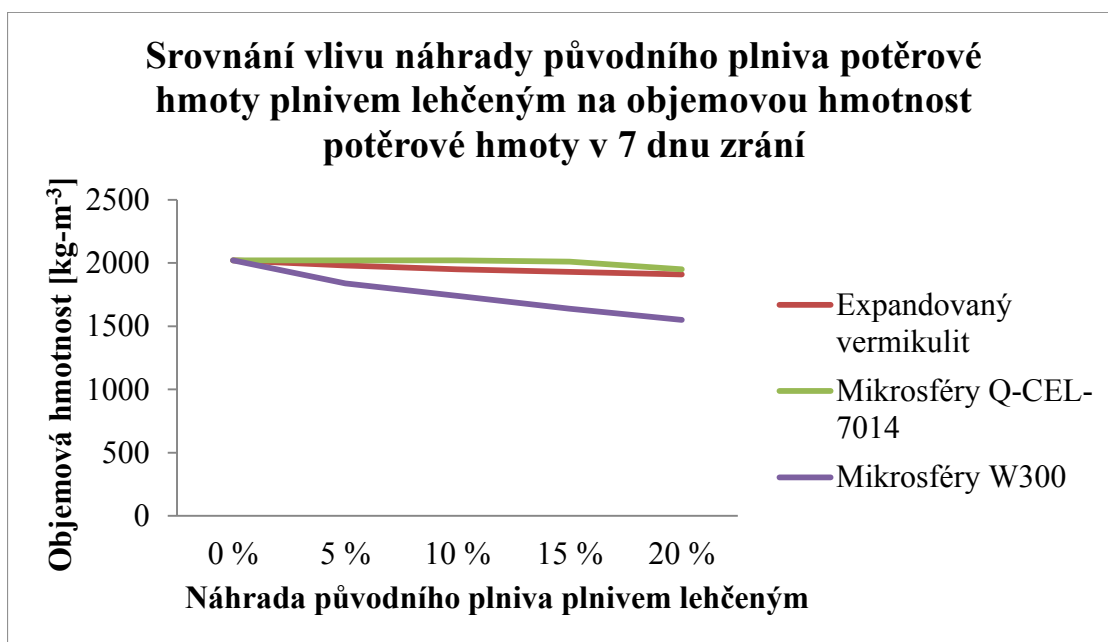


Graf 21: Vodní součinitel při výrobě potěrové hmoty - průzkum vlivu náhrady plniva expandovaným perlitem.

Se zvyšující se náhradou sklářského písku expandovaným vermikulitem je nutno počítat také se zvýšením celkového množství záměsové vody pro udržení požadované konzistence.

Přídavkem mikrosfér Q-CEL-7014 snižujeme potřebné množství záměsové vody pro vytvoření hmoty o totožné konzistenci s hmotou referenční (bez náhrady plniva mikrosférami).

Mikrosféry W300 zvyšují spotřebu záměsové vody.

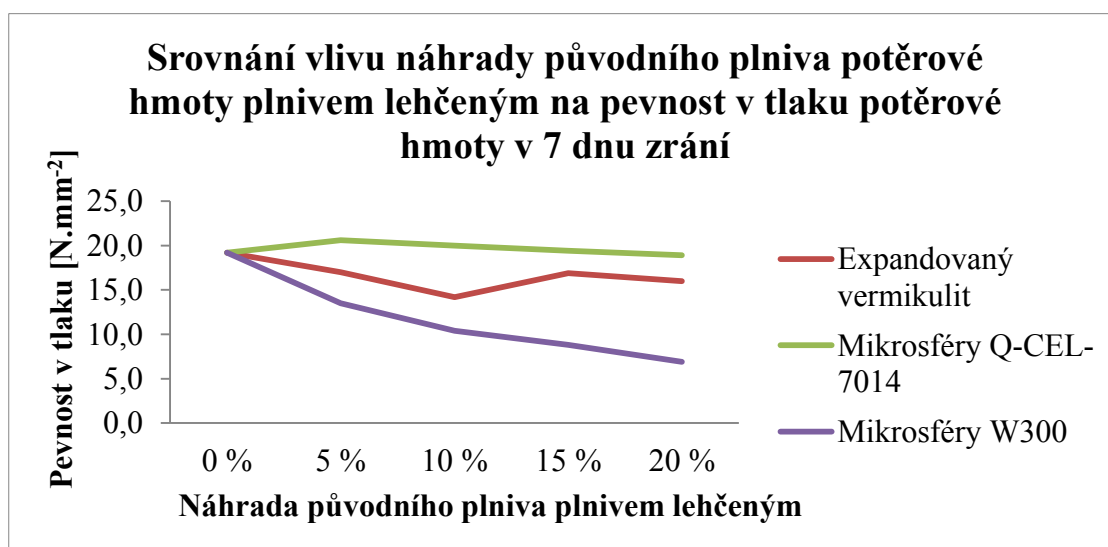


Graf 22: Změna objemové hmotnosti při náhradě sklářského písku lehčeným plnivem.

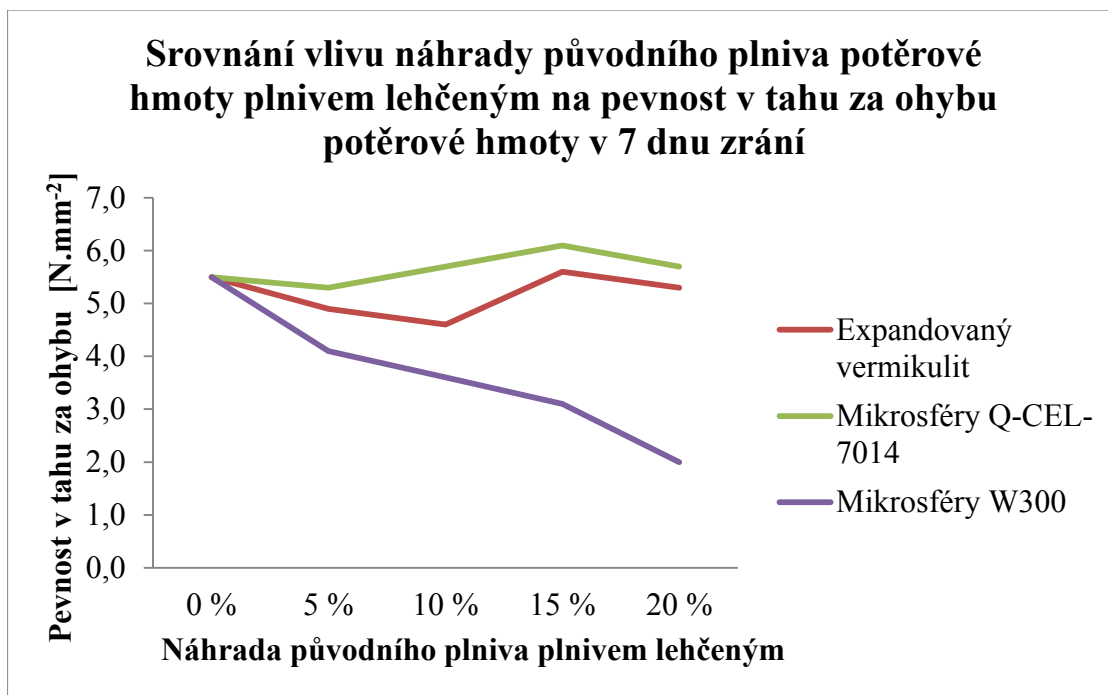
Přídavek expandovaného vermikulitu snižuje objemovou hmotnost potěrové hmoty.

Mikrosféry Q-CEL-7014 mají patrný vliv na vylehčení hmoty až při náhradě plniva v 15 % z celkového objemu plniv. Mikrosféry W300 výrazně snižují objemovou hmotnost potěrové hmoty.

Vliv přidavku expandovaného vermikulitu a mikrosfér na pevnost v tlaku a v tahu za ohybu



Graf 23: Změna pevnosti v tlaku potěrové hmoty při náhradě sklářského písku lehčeným plnivem.



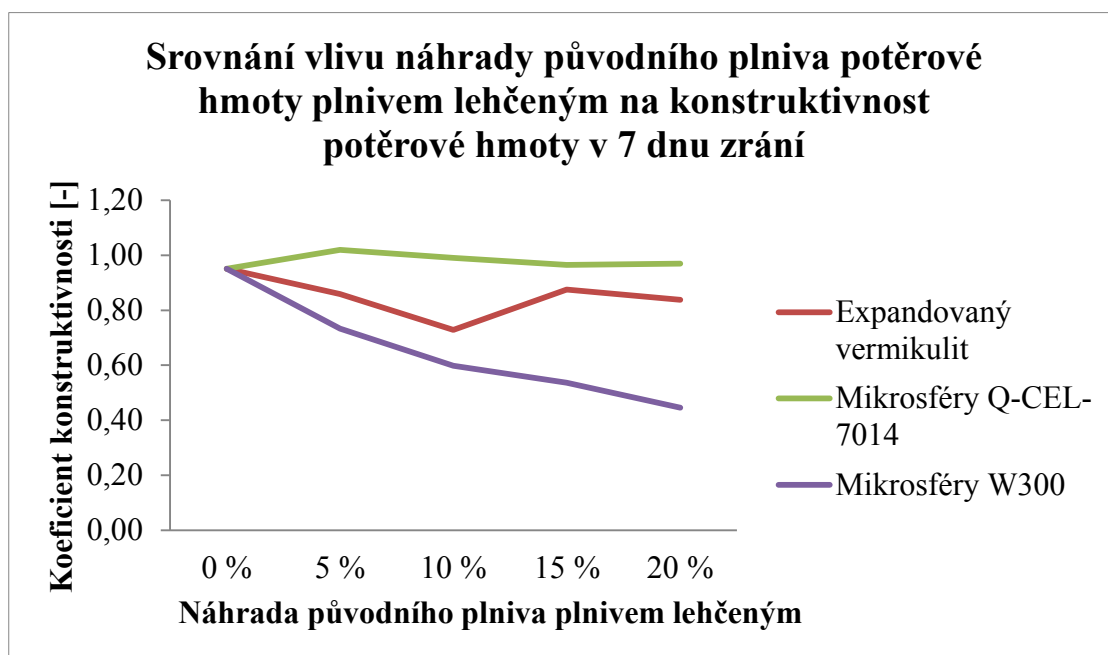
Graf 24: Změna pevnosti v tahu za ohybu potěrové hmoty při náhradě sklářského písku lehčeným plnivem.

Pevnost v tlaku hmoty s přidavkem expandovaného vermikulitu je ovlivněna především způsobem výroby hmoty, a to prioritně jejím hutněním, kdy dochází v povrchových vrstvách hmoty k separaci lehkých plniv vlivem různorodých objemových hmotností. Zároveň je však nutné zohlednit vliv hutnění na pohyb zrn plniva a dále také odlišné fyzikálně-mechanické vlastnosti expandovaného vermikulitu vzhledem ke směru působení mechanického namáhání na jednotlivá zrna. Vzhledem k výše uvedeným faktům je problematické určit vliv náhrady původního plniva expandovaným vermikulitem. Lze však říci, že přidavkem expandovaného vermikulitu klesá odolnost hmoty vůči působení mechanického zatížení.

Pevnost v tlaku potěrové hmoty s náhradou plniva mikrosférami Q-CEL-7014 vykazuje vyšší hodnoty oproti referenční receptuře (bez náhrady plniva) především v hodnotách 5% až 15% náhrady plniva mikrosférami.

Mikrosféry W300 výrazně snižují výslednou pevnost potěrové hmoty.

Vliv přídavku expandovaného vermikulitu a mikrosfér na koeficient konstruktivnosti



Graf 25: Změna konstruktivnosti potěrové hmoty při náhradě sklářského písku lehčeným plnivem.

Konstruktivnost potěrové hmoty s částečnou náhradou plniva expandovaným vermikulitem je závislá na změně objemové hmotnosti a mechanické pevnosti prvku. Tudíž lze uvažovat zkreslující vliv hutnění hmoty a orientaci částic expandovaného vermikulitu na výslednou konstruktivnost hmoty.

Mikrosféry Q-CEL-7014 celkově zvyšují konstruktivnost potěrové hmoty.

Vzhledem k výraznému snížení pevnostních charakteristik potěrové hmoty s náhradou plniva mikrosférami W300 se snižuje i výsledná konstruktivnost hmoty.

Zhodnocení vlivu expandovaného vermikulitu

Přídavek expandovaného vermikulitu snižuje objemovou hmotnost potěrové hmoty, zároveň však snižuje i její pevnostní charakteristiky. Se zvyšujícím se množstvím obsahu expandovaného vermikulitu ve hmotě snižujeme celkovou konstruktivnost hmoty. V případě náhrady části lehčených plniv expandovaným vermikulitem se jeví jako nejvhodnější 15% náhrada.

Zhodnocení vlivu mikrosfér Q-CEL-7014

Náhradou plniva potěrové hmoty mikrosférami typu Q-CEL-7014 lze docílit vylepšení výsledných fyzikálně-mechanických vlastností hmoty a zároveň lze také zvýšit celkovou konstruktivnost hmoty. Mikrosféry Q-CEL-7014 zlepšují zpracovatelnost hmoty a zároveň snižují množství potřebné záměsové vody pro dosažení stejné konzistence v porovnání se vzorkem referenčním (bez náhrady plniva).

Vzhledem k vysoké tržní ceně mikrosfér se jeví jako vhodná především 5% náhrada plniva mikrosférami Q-CEL-7014.

Zhodnocení vlivu mikrosfér Omega-SPHERES W300

Mikrosféry W300 odebírají potěrové hmotě vysoké množství záměsové vody a tím i přes vlastní ztekucující efekt mikrosfér dochází k výraznému zhoršení zpracovatelnosti směsi při zachování dávky vody užití pro referenční potěrovou hmotu (bez náhrady mikrosférami). Přídavek mikrosfér W300 snižuje objemovou hmotnost hmoty, ale zároveň i výrazně snižuje její výsledné pevnostní charakteristiky v počátečním období zrání.

13 NÁVRH SKLADBY CEMENTOVÉHO POTĚRU

Suché směsi pro přípravu komerčních potěrových hmot byly podrobeny chemickému rozboru (Tab. 14).

Tabulka 14: Výsledky chemického rozboru prováděného na komerčních směsích.

Třída	ZŽ	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Chloridy	Nerozpustný zbytek
CT-C12-F3	19,70	3,29	2,44	1,59	30,80	1,59	0,04	0,18	0,12	0,76	0,03	39,20
CT-C20-F4	15,40	5,77	2,56	2,25	26,10	1,48	0,06	0,58	0,14	1,24	0,03	41,37
CT-C30-F5	18,40	5,55	2,63	1,93	32,90	1,36	0,05	0,43	0,14	1,34	0,04	34,25
CT-C35-F5	10,60	6,96	3,49	2,66	24,50	1,62	0,06	0,66	0,16	1,76	0,04	46,70

Dávka cementu byla pevně stanovena pro referenční potěrovou hmotu i hmoty modifikované. Pro referenční potěr bylo užito plniva v podobě sklářského písku, bez náhrady lehčeným plnivem. Pro potřeby práce byly vytvořeny dva druhy referenčních hmot. Byla vytvořena potěrová hmota bez náhrady cementu popílkem a referenční potěrová hmota s náhradou cementu popílkem Dětmárovice. Pro směsi modifikovaných potěrových hmot bylo nahrazováno plnivo v podobě sklářského písku lehčenými plnivy.

Popílek Dětmárovice byl přidáván v množství 20 % z obsahu cementu. Mikrosilika Sioxid Microsit byla v závislosti na předešlé výzkumy fakulty stavební v oblasti potěrových hmot přidávána v množství 2 % z hmotnosti cementu, plastifikátor Elotex FL 1200 v množství 0,8 % z množství cementu a Melment M10 v množství 0,2 % z hmotnosti cementu.

Množství cementu CEM I 42,5 R Hranice bylo stanoveno na základě požadavků na potěrové hmoty a dále na základě odborné rozpravy se znalci v oblasti potěrových hmot. Obsah cementu činí 25 %.

Obsah vody v jednotlivých směsích byl měněn na základě srovnatelné konzistence čerstvé potěrové hmoty jednotlivých receptur.

Jednotlivé receptury referenční potěrové hmoty a modifikovaných potěrových hmot jsou součástí přílohy B.

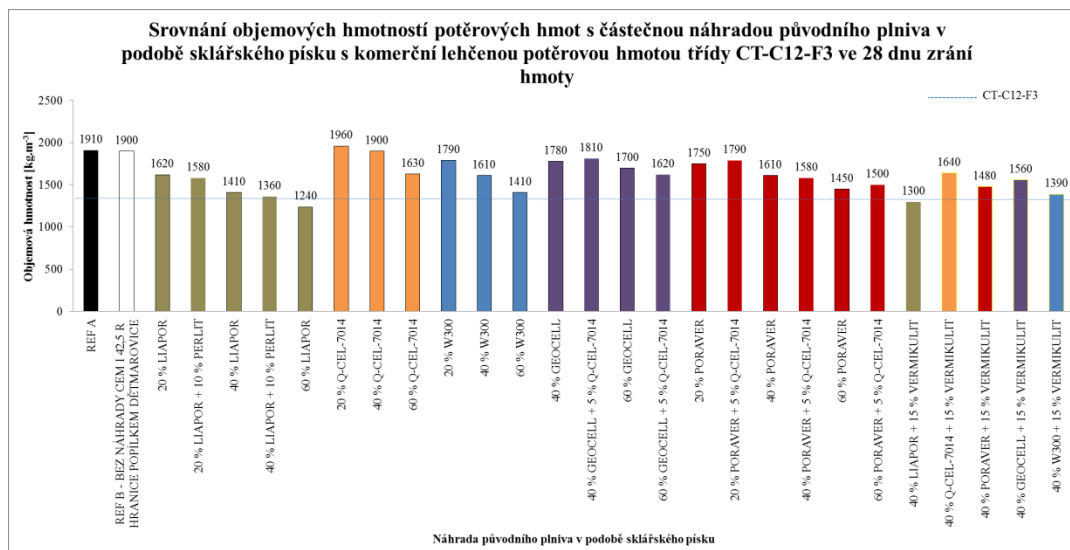
14 ZKOUŠKY NA LEHČENÝCH POTĚROVÝCH HMOTÁCH

Stanovení odolnosti proti obrusu bylo prováděno na vybraných tělesech (Tab. 15).

Tabulka 15: Stanovení odolnosti proti obrusu vybraných modifikovaných potěrových hmot.

Vzorek	A [cm ³ na 50 cm ²]
REF A	8,6
40 % Liapor	8,9
40 % Q-CEL-7014	7,0
40 % W300	10,6
40 % Geocell	8,8
40 % Poraver	9,6
40 % Liapor + 10 % perlit	11,9
40 % Q-CEL-7014 + 15 % vermikulit	9,1
40 % W300 + 15 % vermikulit	8,3

Jednotlivé výsledky jsou srovnávány s komerční lehčenou potěrovou hmotou třídy CT-C12-F3.



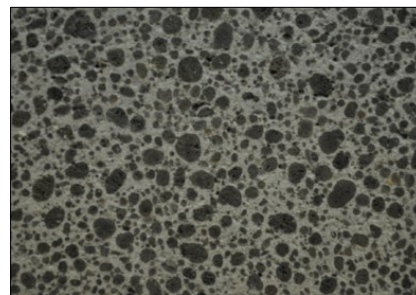
Graf 26: Objemová hmotnost modifikovaných těles.

Nejnižší objemové hmotnosti dosahuje receptura s 60% náhradou sklářského písku kamenivem Liapor.

Se zvyšujícím se podílem lehčeného kameniva Liapor (Obr. 23) dochází ke snižování objemové hmotnosti potěrové hmoty. Částečná náhrada sklářského písku kamenivem

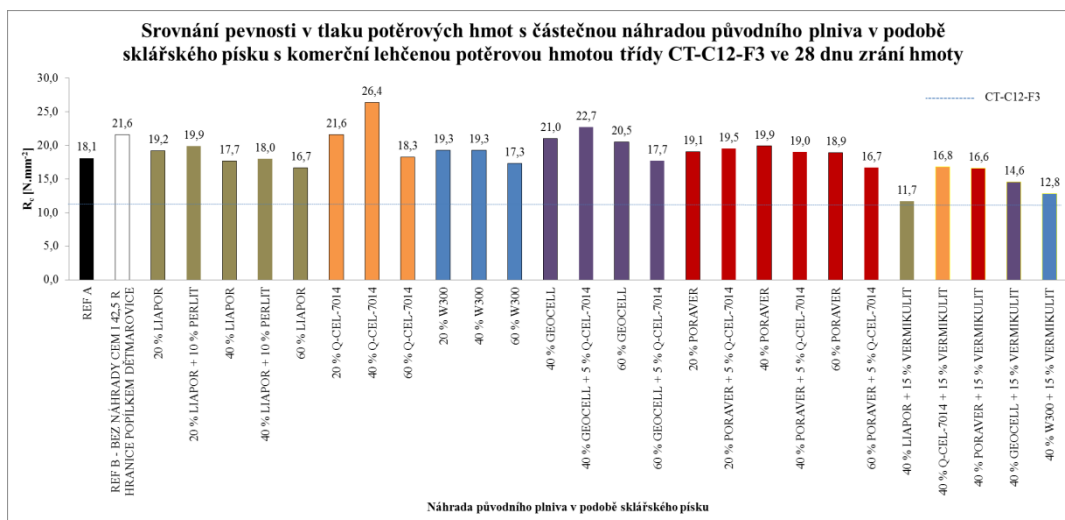
Liapor v kombinaci s expandovaným perlitem a vermikulitem snižuje objemovou hmotnost prvku více než samotný přírůstek kameniva Liapor.

Zvyšující se podíl kameniva Poraver má za následek snižování objemové hmotnosti za současného zvyšování konstruktivnosti prvku. Plnivo Geocell má pozitivní vliv na snižování objemové hmotnosti hmoty a zároveň na zvyšování mikrotvrdosti povrchu.



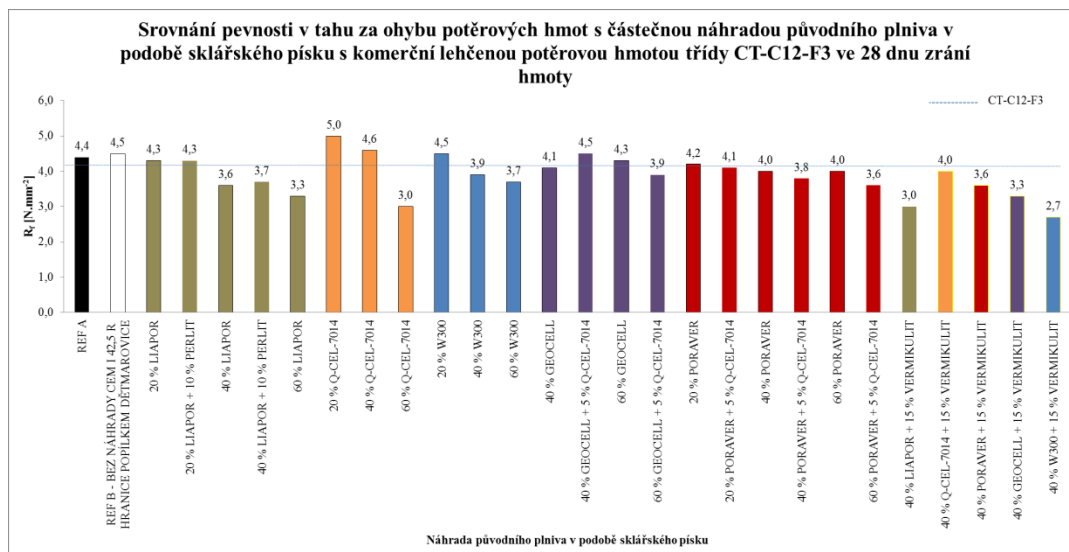
Obrázek 23: Modifikovaná receptura s kamenivem Liapor

Mikrosféry Q-CEL-7014 a Omega-SPHERES W300 snižují objemovou hmotnost hmoty, a to především při více jak 20% náhradě sklářského písku mikrosférami



Graf 27: Pevnost v tlaku modifikovaných těles

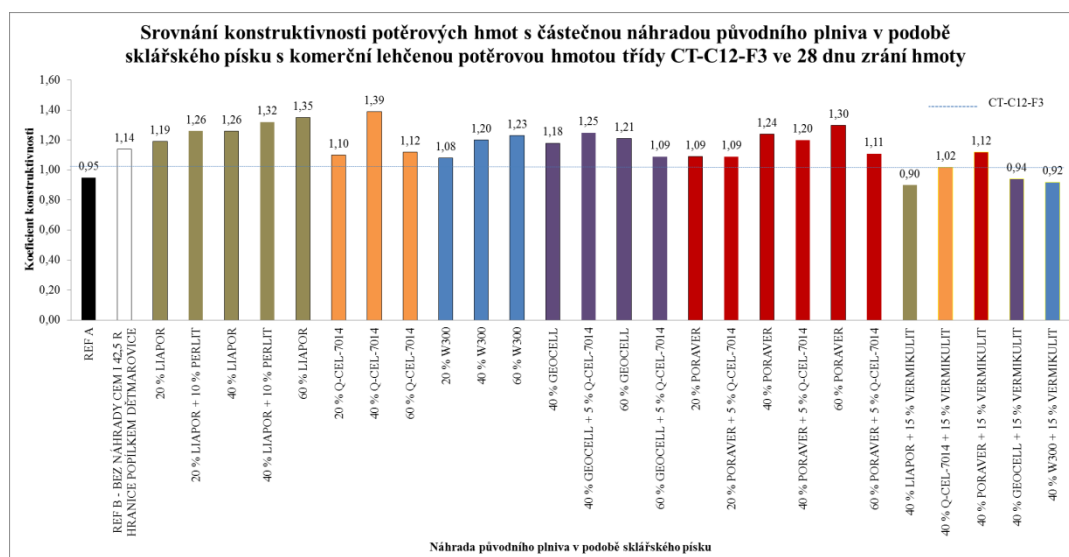
Náhrada kameniva Liapor expandovaným vermikulitem má za následek pokles pevnosti v tlaku, pevnosti v tahu za ohybu a mikrotvrdosti povrchu.



Graf 28: Pevnost v tahu za ohybu modifikovaných těles

S využitím expandovaného vermikulitu snižujeme nejen objemovou hmotnost, ale zároveň i pevnostní charakteristiky materiálu a jeho konstruktivnost.

S částečnou náhradou sklářského pisku granulátem Poraver v kombinaci s expandovaným vermikulitem dojde ke snížení pevnostních charakteristik za současného snížení objemové hmotnosti, což má vzhledem ke snížené pevnosti za následek samotné snížení koeficientu konstruktivnosti.

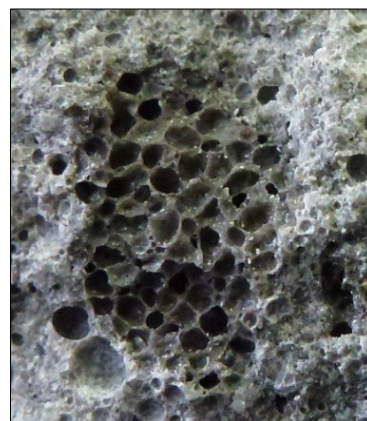


Graf 29: Koeficient konstruktivnosti modifikovaných těles

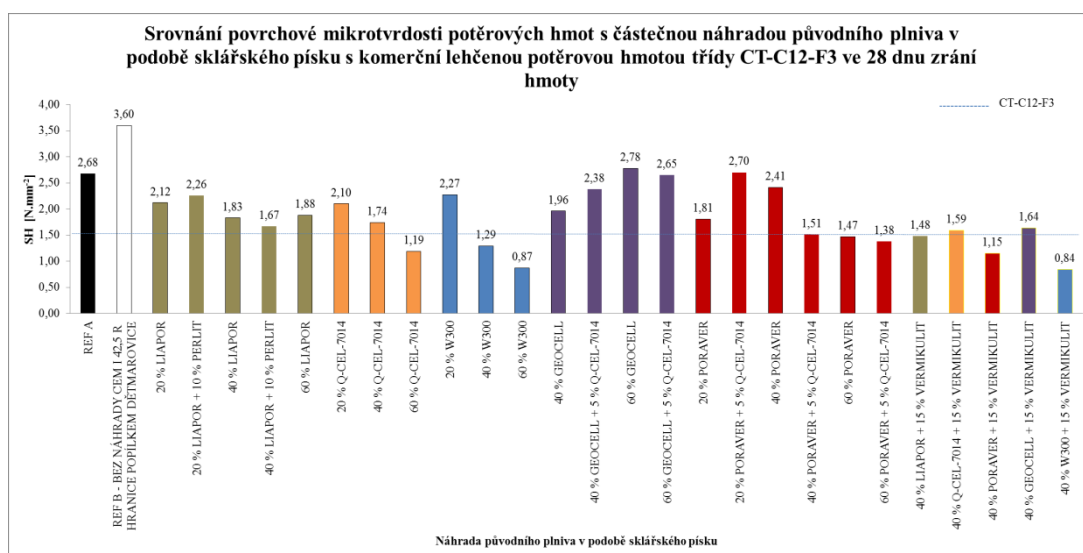
Se zvyšujícím se podílem kameniva Liapor zvyšujeme celkovou konstruktivnost hmoty. Náhrada sklářského písku kamenivem Liapor v kombinaci s expandovaným perlitem a vermikulitem celkovou konstruktivnost hmoty snižuje.

Obdobně jako expandovaný vermikulit i mikrosféry Q-CEL-7014 negativně ovlivňují konstruktivnost hmoty, a to především vzhledem k vysoké objemové hmotnosti potěrové hmoty s obsahem mikrosfér Q-CEL-7014.

Konstruktivnost modifikovaných potěrových hmot s náhradou původního plniva v podobě sklářského písku sklopěnovým recyklátem Geocell (Obr. 24) se zvyšuje s přidávkou samotného kameniva Geocell.



Obrázek 24: Detail kotvení zrn Geocell v matici potěrové hmoty



Graf 30: Mikrotvrdost povrchu modifikovaných těles

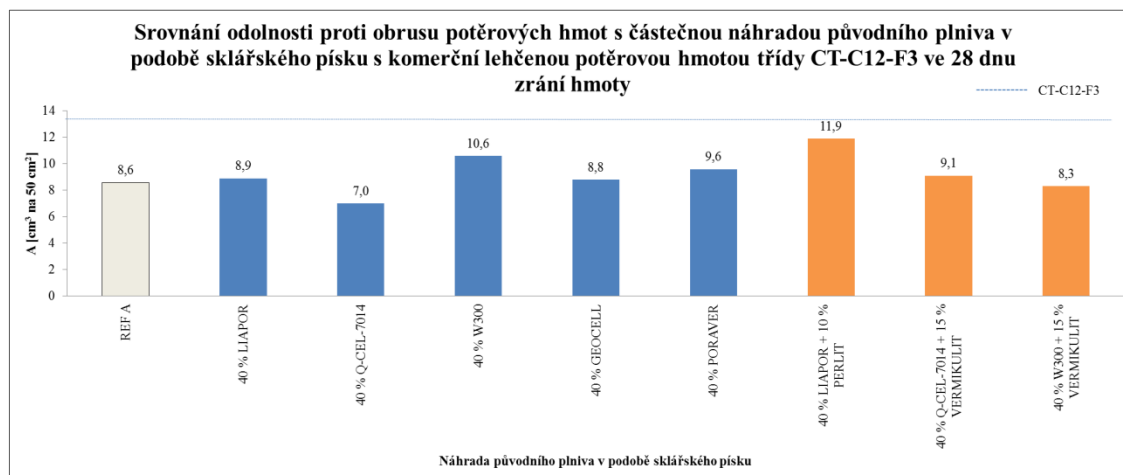
Při využití kameniva Poraver docházelo u jednotlivých vzorků k oddělování hran (Obr. 25).

Hlavní rozdíl mezi uváděnými mikrosférami je především ve zpracovatelnosti. V případě mikrosfér Omega-SPHERES W300 musíme počítat s navýšením množství potřebné záměsové vody a v případě mikrosfér Q-CEL-7014 se snížením obsahu záměsové vody, ale zároveň i s nákladnějším postupem při mísení jednotlivých komponent suché potěrové směsi. Je nutné



Obrázek 25: Zkušební těleso s využitím kameniva Poraver - foceno 28 den zrání

poukázat na pozitivní vliv mikrosfér Omega-SPHERES W300 a negativní vliv mikrosfér Q-CEL-7014 na výslednou odolnost hmoty vůči obruš.



Graf 31: Odolnost proti obruš stanovovaná na vybraných modifikovaných tělesech

15 OPTIMALIZAČNÍ VÝPOČET

Na základě teoretické rešerše v oblasti potěrových hmot byly zvoleny základní kritéria (zpracovatelnost, objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku, dostupnost a cena).

Výsledky jednotlivých zkoušek na modifikovaných potěrových hmotách uvádí tabulka 16.

Tabulka 16: Výsledky zkoušek na modifikovaných potěrových hmotách.

Receptura	Náhrada sklářského písku	w [-]	Φ_{ZP} [kg.m ⁻³]	R_f [N.mm ⁻²]	R_c [N.mm ⁻²]	k_k [-]	SH [N.mm ⁻²]
R3	20 % Liapor	0,66	1620	4,3	19,2	1,19	2,12
R4	20 % Liapor + 10 % perlit	0,73	1580	4,3	19,9	1,26	2,26
R5	40 % Liapor	0,72	1410	3,6	17,7	1,26	1,83
R6	40 % Liapor + 10 % perlit	0,77	1360	3,7	18,0	1,32	1,67
R7	60 % Liapor	0,78	1240	3,3	16,7	1,35	1,88
R8	20 % Q-CEL-7014	0,60	1960	5,0	21,6	1,10	2,10
R9	40 % Q-CEL-7014	0,58	1900	4,6	26,4	1,39	1,74
R10	60 % Q-CEL-7014	0,51	1630	3,0	18,3	1,12	1,19
R11	20 % W300	0,71	1790	4,5	19,3	1,08	2,27
R12	40 % W300	0,71	1610	3,9	19,3	1,20	1,29
R13	60 % W300	0,70	1410	3,7	17,3	1,23	0,87
R14	40 % Geocell	0,57	1780	4,1	21,0	1,18	1,96
R15	40 % Geocell + 5 % Q-CEL-7014	0,54	1810	4,5	22,7	1,25	2,38
R16	60 % Geocell	0,52	1700	4,3	20,5	1,21	2,78
R17	60 % Geocell + 5 % Q-CEL-7014	0,50	1620	3,9	17,7	1,09	2,65
R18	20 % Poraver	0,65	1750	4,2	19,1	1,09	1,81
R19	20 % Poraver + 5 % Q-CEL-7014	0,62	1790	4,1	19,5	1,09	2,70
R20	40 % Poraver	0,57	1610	4,0	19,9	1,24	2,41
R21	40 % Poraver + 5 % Q-CEL-7014	0,56	1580	3,8	19,0	1,20	1,51
R22	60 % Poraver	0,55	1450	4,0	18,9	1,30	1,47
R23	60 % Poraver + 5 % Q-CEL-7014	0,58	1500	3,6	16,7	1,11	1,38
R24	40 % Liapor + 15 % vermikulit	0,77	1300	3,0	11,7	0,90	1,48
R25	40 % Q-CEL-7014 + 15 % vermikulit	0,68	1640	4,0	16,8	1,02	1,59
R26	40 % Poraver + 15 % vermikulit	0,62	1480	3,6	16,6	1,12	1,15
R27	40 % Geocell + 15 % vermikulit	0,68	1560	3,3	14,6	0,94	1,64
R28	40 % W300 + 15 % vermikulit	0,76	1390	2,7	12,8	0,92	0,84

Zpracovatelnost byla určena na základě potřebného navýšení, případně snížení vodního součinitele potřebného k dosažení konzistence srovnatelné s konzistencí dosažené během přípravy referenční hmoty. Objemová hmotnost, pevnost v tahu za

ohybu a pevnost v tlaku byla pro jednotlivé modifikované hmoty určena na základě vykonaných pevnostních zkoušek. Dostupnost je řešena z pohledu ekonomické náročnosti na dovoz materiálu od dodavatele k odběrateli. Cenou zde rozumíme celkové hrubé náklady na zakoupení potřebných plniv.

Pro optimalizační výpočet byla vytvořena tabulka jednotlivých kritérií. Následně byla jednotlivá kritéria seřazena dle důležitosti (Tab. 17, 18).

Tabulka 17: Optimalizační kritéria.

Kritérium	Značka	Jednotka
Zpracovatelnost dle vodního součinitele potřebného k dosažení konzistence srovnatelné s referenční směsí	w	[-]
Objemová hmotnost potěrové hmoty	φ_{ZP}	[kg.m ⁻³]
Pevnost v tahu za ohybu	R _f	[N.mm ⁻²]
Pevnost v tlaku	R _C	[N.mm ⁻²]
Koeficient konstruktivnosti	k _k	[-]
Mikrotvrdost povrchu	SH	[N.mm ⁻²]
Cena za m ³	Cena	[Kč.m ⁻³]
Vzdálenost	Vzdálenost - firma	[km]

Tabulka 18: Optimalizační kritéria dle důležitosti.

Pořadí	Kritérium	Důležitost
1	W	7
2	φ_{ZP}	3
3	R _f	6
4	R _C	5
5	k _k	4
6	SH	8
7	Cena	1
8	Vzdálenost – firma	2

Jednotlivými dodavateli určená cena plniv byla doplněna o vzdálenost od dodavatele k odběrateli suroviny (Tab. 19).

Tabulka 19: Kombinovaná cena plniv a kombinovaná vzdálenost plniv dodavatel-odběratel.

Receptura	Kombinovaná cena plniva [Kč.m ⁻³]	Kombinovaná vzdálenost dodavatel - odběratel [km]
R3	1255,96	389
R4	1155,14	531
R5	1280,72	389
R6	1179,9	531
R7	1305,48	389
R8	4184,96	106
R9	7138,72	106
R10	10092,48	106
R11	4184,96	750
R12	7138,72	750
R13	10092,48	750
R14	1009,32	154
R15	1747,76	260
R16	898,38	154
R17	1636,82	260
R18	2492,96	148
R19	3231,4	254
R20	3754,72	148
R21	4493,16	254
R22	5016,48	148
R23	5754,92	254
R24	1567,04	736
R25	7425,04	453
R26	4041,04	495
R27	1295,64	501
R28	7425,04	1097

Optimalizace dle Fullera

Pro potřeby optimalizačního výpočtu byl volen výpočet metodou párového srovnávání hodnot a dále byl sestaven tzv. Fullerův trojúhelník (Tab. 20). Metoda párového srovnávání hodnot je založena na srovnání dvojic kritérií a následném výpočtu váhy jednotlivých kritérií.

Tabulka 20: Fullerův trojúhelník (Každá druhá úroveň s číslem jedna vyjadřuje vyšší hladinu významnosti dané úrovně ve srovnání s úrovní následující dle číselného pořadí).

1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	1	0	0
2	2	2	2	2	2	
1	1	1	1	0	0	
3	3	3	3	3		
0	0	1	0	0		
4	4	4	4			
0	1	0	0			
5	5	5				
1	0	0				
6	6					
0	0					
7						
1						

Pomocí Fullerova trojúhelníku byly dopočteny váhy jednotlivých kritérií (Tab. 21).

Tabulka 21: Váhy kritérií pro optimalizační výpočet dle Fullera.

Kritérium	Bodů	P_i	V_i	F_i
1	1	7	2	0,0556
2	5	3	6	0,1667
3	2	6	3	0,0833
4	3	5	4	0,1111
5	4	4	5	0,1389
6	0	8	1	0,0278
7	7	1	8	0,2222
8	6	2	7	0,1944

Následně byla dle vah kritérií dopočtena matice pro vyhodnocení nejvhodnějších receptur.

Výsledky vyhodnocení jednotlivých modifikovaných receptur lehčených potěrových hmot udává tabulka 22.

Tabulka 22: Výsledky optimalizačního výpočtu dle Fullera.

Receptura		Výsledek [%]
R3	20 % Liapor	66,99
R4	20 % Liapor + 10 % perlit	66,75
R5	40 % Liapor	68,51
R6	40 % Liapor + 10 % perlit	68,17
R7	60 % Liapor	71,99
R8	20 % Q-CEL-7014	60,61
R9	40 % Q-CEL-7014	65,14
R10	60 % Q-CEL-7014	45,10
R11	20 % W300	45,81
R12	40 % W300	42,74
R13	60 % W300	38,36
R14	40 % Geocell	70,30
R15	40 % Geocell + 5 % Q-CEL-7014	71,80
R16	60 % Geocell	75,80
R17	60 % Geocell + 5 % Q-CEL-7014	67,15
R18	20 % Poraver	62,16
R19	20 % Poraver + 5 % Q-CEL-7014	59,13
R20	40 % Poraver	68,94
R21	40 % Poraver + 5 % Q-CEL-7014	62,14
R22	60 % Poraver	69,59
R23	60 % Poraver + 5 % Q-CEL-7014	55,31
R24	40 % Liapor + 15 % vermikulit	45,09
R25	40 % Q-CEL-7014 + 15 % vermikulit	41,45
R26	40 % Poraver + 15 % vermikulit	54,25
R27	40 % Geocell + 15 % vermikulit	50,78
R28	40 % W300 + 15 % vermikulit	21,35

Dle výsledků optimalizačního výpočtu metodou párového srovnávání hodnot se jeví jako nejvhodnější využít 60% náhrady sklářského písku plnivem v podobě drceného pěnového skla Geocell. V pořadí dalšími vhodnými plnivy lze uvažovat 40% a 60% náhradu sklářského písku kamenivem Poraver, 40% a 60% náhradu sklářského písku kamenivem Liapor a 40% náhradu sklářského písku drceným pěnovým sklem Geocell.

Optimalizace dle Saatiho

Pro optimalizační výpočet bylo dále využito metody kvantitativního párového srovnávání dle Saatiho. Pro výpočet byla sestavena Saatiho matice (Tab. 23).

Tabulka 23: Saatiho rozhodovací matice a výpočet váhy kritérií.

Kritérium	1	2	3	4	5	6	7	8	$S_{i,j}$	$R_{i,j}$	f_i
1	1,00	0,50	6,00	3,00	4,00	5,00	7,00	2,00	2520,0000	2,6618	0,2407
2	2,00	1,00	7,00	4,00	5,00	6,00	8,00	3,00	40320,0000	3,7644	0,3403
3	0,17	0,14	1,00	0,25	0,33	0,50	2,00	5,00	0,0099	0,5618	0,0508
4	0,33	0,25	4,00	1,00	2,00	3,00	5,00	0,50	5,0000	1,2228	0,1106
5	0,25	0,20	3,00	0,50	1,00	2,00	4,00	0,33	0,2000	0,8178	0,0739
6	0,20	0,17	2,00	0,33	0,50	1,00	3,00	0,25	0,0083	0,5497	0,0497
7	0,14	0,13	0,50	0,20	0,25	0,33	1,00	0,17	0,0000	0,2657	0,0240
8	0,50	0,33	0,20	2,00	3,00	4,00	6,00	1,00	4,8000	1,2166	0,1100

Suma f_i	1
------------	---

Výsledky vyhodnocení jsou vypsány v tabulce 24.

Tabulka 24: Výsledky kvantitativního párového srovnávání hodnot dle Saatiho.

Receptura		Výsledek [%]
R3	20 % Liapor	53,24
R4	20 % Liapor + 10 % perlit	49,76
R5	40 % Liapor	55,71
R6	40 % Liapor + 10 % perlit	53,06
R7	60 % Liapor	58,73
R8	20 % Q-CEL-7014	46,91
R9	40 % Q-CEL-7014	56,85
R10	60 % Q-CEL-7014	58,98
R11	20 % W300	35,43
R12	40 % W300	41,48
R13	60 % W300	48,11
R14	40 % Geocell	55,98
R15	40 % Geocell + 5 % Q-CEL-7014	60,71
R16	60 % Geocell	66,82
R17	60 % Geocell + 5 % Q-CEL-7014	66,30
R18	20 % Poraver	47,52
R19	20 % Poraver + 5 % Q-CEL-7014	48,99
R20	40 % Poraver	64,72
R21	40 % Poraver + 5 % Q-CEL-7014	61,59
R22	60 % Poraver	71,39
R23	60 % Poraver + 5 % Q-CEL-7014	59,31
R24	40 % Liapor + 15 % vermikulit	40,24
R25	40 % Q-CEL-7014 + 15 % vermikulit	41,71
R26	40 % Poraver + 15 % vermikulit	53,96
R27	40 % Geocell + 15 % vermikulit	42,28
R28	40 % W300 + 15 % vermikulit	30,13

Z výsledků kvantitativního párového srovnávání hodnot dle Saatiho vyplývá nejvyšší vhodnost využití plniva v podobě expandovaného skelného odpadu, a to jmenovitě Poraveru a Geocellu.

16 SHRUTÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

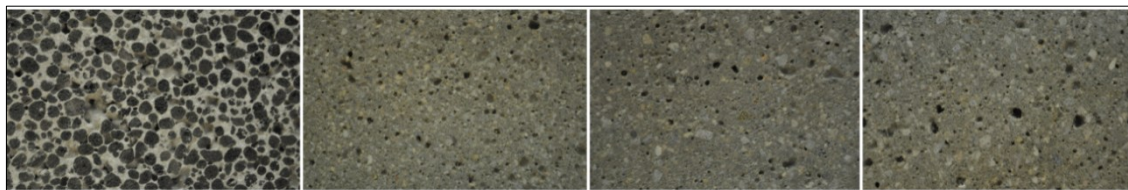
16.1 Etapa I – Návrh a metodika zkušebních těles

Postup výroby zkušebních těles a postup zkoušek prováděných na připravených tělesech byl v souladu s normovými požadavky dle předpisů ČSN EN 13892, ČSN EN 933 a ČSN EN 993. Komerční směs byla podrobena granulometrické, termické, difrakční a chemické analýze.

16.2 Etapa II – Zkoušky komerčních směsí

Jednotlivé modifikované potěrové hmoty obsahují různé množství záměsové vody, a to s přihlédnutím na srovnání jednotlivých receptur na základě stejné konzistence čerstvého potěru. Testy konzistence byly prováděny na střešacím stolku dle postupu uváděném v technickém předpisu ČSN EN 1015.

Zkušební tělesa (řez – obr. 23) se skládají ze sad vzorků 40 x 40 x 160 mm na stanovení objemové hmotnosti, mikrotvrdosti povrchu, pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku a dále ze zkušebních těles o rozměrech spodní podstavy 71 x 71 mm pro zjišťování odolnosti proti obrušování a těles o rozměrech 200 x 200 x 100 mm pro stanovení součinitele tepelné vodivosti.



Obrázek 26: Řezy zkušebními tělesy - z leva do prava CT-C12-F3, CT-C20-F4, CT-C25-F5, CT-C30-F5 (foto autor, kompozice autor).

Jednotlivá tělesa komerčních potěrových hmot byla po odformování laboratorně uložena pro 7, 28 a 90 denní pevnostní zkoušky a dále pro 28 denní zkoušky odolnosti proti obrušování a stanovení součinitele tepelné vodivosti (Tab. 25).

Tabulka 25: Výsledky zkoušek na komerčních potěrech.

Třída	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	φ_{zp} [kg.m ⁻³]	R_c [N.mm ⁻²]	R_f [N.mm ⁻²]	A [cm ³ na 50 cm ²]	SH [N.mm ⁻²]
CT-C12-F3	0,43	1110	10,9	3,6	13,5	1,20
CT-C20-F4	1,09	2110	25,3	5,7	6,0	3,44
CT-C25-F4	1,27	2090	31,4	6,3	5,5	3,68
CT-C30-F5	1,14	2190	30,4	6,6	5,3	2,63

16.3 Etapa III – Výběr vhodných surovin

Dávka cementu byla pevně stanovena pro referenční vzorek na 25 %. Popílek byl přidáván v množství 20 % z obsahu cementu. Mikrosilika Sioxid Microsit byla v závislosti na předešlé výzkumy fakulty stavební přidávána v množství 2 % z hmotnosti cementu, plastifikátor Elotex FL 1200 v množství 0,8 % z množství cementu a Melment M10 v množství 0,2 % z hmotnosti cementu.

Plnivo referenční potěrové hmoty v podobě sklářského písku bylo v modifikovaných recepturách částečně nahrazováno lehčeným plnivem (Obr. 24), a to především lehčeným plnivem vyráběným z odpadních látek. Výběr vhodných plniv probíhal na základě ekonomicko-technických požadavků na plniva potěrových hmot. Receptury obsahující základní lehčená plniva v podobě kameniva Liapor, sklopěnového granulátu Geocell a Poraver, mikrosfér Q-CEL-70-14 a Omega-SPHERES W300, byly modifikovány částečnou náhradou plnivy v podobě expandovaného perlitu a expandovaného vermikulitu.



Obrázek 27: Lehčená plniva – zleva doprava Liapor, Geocell, Poraver, expandovaný perlit, expandovaný vermikulit, Q-CEL-7014, Omega-SPHERES W300 (foto autor, kompozice autor).

16.4 Etapa IV – Vliv množství lehčeného kameniva na výsledné vlastnosti hmoty

V této etapě byl zkoumán vliv množství lehčeného kameniva v potěrové hmotě na výsledné vlastnosti potěrové hmoty. Prioritně byl zkoumán vliv expandovaného perlitu a expandovaného vermikulitu, dále byl sledován vliv mikrosfér, a to především na zpracovatelnost hmoty.

Z výsledků je patrné snižování pevnostních charakteristik a zároveň i snižování konstruktivnosti potěrové hmoty vlivem použitého expandovaného perlitu. Při využití expandovaného perlitu se jeví jako vhodné využít maximálně 10 % náhrady původního plniva v podobě sklářského písku expandovaným perlitem.

Expandovaný vermikulit vykazuje nesourodé výsledky vzhledem k vlastní tvarové skladbě vermikulitu vzniklé za procesu exfoliace. Pro zkoušky vlivu expandovaného vermikulitu na výsledné vlastnosti potěrové hmoty byla volena 15 % náhrada sklářského písku expandovaným vermikulitem.

Mikrosféry Q-CEL-7014 mění reologii směsi pro výrobu potěrové hmoty. Při správné distribuci jednotlivých zrn způsobené mísením jednotlivých komponent potěrové směsi lze docílit snížení vodního součinitele za současného snížení odporu při mísení potěrové směsi. Hlavní nevýhodou mikrosfér Q-CEL-7014 je samovolné shlukování částic. Aglomeráty mikrosfér Q-CEL-7014 je nutné mechanicky rozrušit a následně dispergovat do celého objemu potěrové hmoty.

Mikrosféry Omega-SPHERES W300 obdobně jako mikrosféry Q-CEL-7014 zlepšují reologické vlastnosti suché potěrové směsi. Mikrosféry Omega-SPHERES W300 však odebírají směsi záměsovou vodu a je tudíž i přes reologické vlastnosti mikrosfér Omega-SPHERES W300 nutné přidávat vyšší množství záměsové vody.

16.5 Etapa V – Návrh receptury

Návrh skladby referenční potěrové hmoty byl zvolen na 25 % pojiv (CEM I 42,5 R Hranice, popílek Dětmárovice, aditiva) a 75 % plniva v podobě sklářského písku. Vzhledem k užití popílku Dětmárovice byla připravena i referenční směs bez náhrady cementu popílkem (CEM I 42,5 R Hranice, aditiva).

Referenční receptura byla modifikována základními typy lehčených plniv – Liapor, Geocell, Poraver, Q-CEL-7014 a Omega-SPHERES W300, náhradou sklářského písku 20, 40 a 60 % objemově. Receptury s náhradou sklářského písku kamenivem Liapor byly modifikovány 10 % náhradou kameniva Liapor expandovaným perlitem. Receptury s náhradou sklářského písku expandovaným skelným odpadem Geocell a Poraver byly modifikovány 5 % náhradou lehčených plniv mikrosférami Q-CEL-7014. Zároveň byly všechny základní typy lehčených plniv modifikovány kombinovanou 15% náhradou plniva expandovaným vermikulitem.

16.6 Etapa VI – Zkoušky na referenčních směsích

Pro srovnání modifikovaných receptur byly připraveny dvě referenční receptury. První, základní referenční receptura značená REF A obsahuje plnivo v podobě sklářského písku (75 %) a pojivo (25 %) v podobě CEM I 42,5 R Hranice, popílek Dětmárovice a aditiva. Druhá, doplňující referenční receptura značená REF B se skládá z plniva v podobě sklářského písku (75 %) a pojiva (25 %) v podobě CEM I 42,5 R Hranice a aditiva o stejném poměru ve srovnání s recepturou A. Výsledky jednotlivých měření uvádí tabulka 26.

Tabulka 26: Výsledky měření na referenčních recepturách.

Vzorek	φ_{zp} [kg.m ⁻³]	R_c [N.mm ⁻²]	R_f [N.mm ⁻²]	A [cm ³ na 50 cm ²]	SH [N.mm ⁻²]
REF A	1910	18,1	4,4	8,6	2,68
REF B	1900	21,6	4,5	6,4	3,60

Modifikované receptury byly primárně srovnávány s recepturou referenční potěrové hmoty s částečnou náhradou pojiva popílkem Dětmárovice označené REF A.

16.7 Etapa VII – Zkoušky na modifikovaných tělesech

Jako nejvhodnější se jeví modifikované receptury s obsahem 40 % a 60 % plniva v podobě Geocell, Poraver, Liapor. Vhodná se jeví 60 % náhrada sklářského písku mikrosféricami Omega-SPERES W300. Při využití expandovaného vermikulitu byl u vzorků s přídavkem Geocellu a mikrosfér Q-CEL-7014 pozorován postupný vnější rozpad tělesa (drolení hran, pozorováno do 28 dne zrání, Obr. 28).



Obrázek 28: Rozpad vzorku s 40 % Q-CEL-7014, 15 % expandovaného vermikulitu a 45 % sklářského písku

Přídavek expandovaného vermikulitu se jeví jako nevhodný vzhledem k dosaženým vlastnostem, a to především vzhledem k pevnostním charakteristikám. Přídavek mikrosfér Q-CEL-7014 má pouze nepatrný vliv na zlepšení kvalitativních vlastností potěrové hmoty.

Výsledky měření uvádí tabulka 27.

Tabulka 27: Výsledky měření na modifikovaných tělesech.

Vzorek	φ_{zp} [kg.m ⁻³]	R_c [N.mm ⁻²]	R_f [N.mm ⁻²]	SH [N.mm ⁻²]
20 % Liapor	1620	19,2	4,3	2,12
20 % Liapor + 10 % perlit	1580	19,9	4,3	2,26
40 % Liapor	1410	17,7	3,6	1,83
40 % Liapor + 10 % perlit	1360	18,0	3,7	1,67
60 % Liapor	1240	16,7	3,3	1,88
20 % Q-CEL-7014	1960	21,6	5,0	2,10
40 % Q-CEL-7014	1900	26,4	4,6	1,74
60 % Q-CEL-7014	1630	18,3	3,0	1,19
20 % W300	1790	19,3	4,5	2,27
40 % W300	1610	19,3	3,9	1,29
60 % W300	1410	17,3	3,7	0,87
40 % Geocell	1780	21,0	4,1	1,96
40 % Geocell + 5 % Q-CEL-7014	1810	22,7	4,5	2,38
60 % Geocell	1700	20,5	4,3	2,78
60 % Geocell + 5 % Q-CEL-7014	1620	17,7	3,9	2,65
20 % Poraver	1750	19,1	4,2	1,81
20 % Poraver + 5 % Q-CEL-7014	1790	19,5	4,1	2,70
40 % Poraver	1610	19,9	4,0	2,41
40 % Poraver + 5 % Q-CEL-7014	1580	19,0	3,8	1,51
60 % Poraver	1450	18,9	4,0	1,47
60 % Poraver + 5 % Q-CEL-7014	1500	16,7	3,6	1,38
40 % Liapor + 15 % vermikulit	1300	11,7	3,0	1,48
40 % Q-CEL-7014 + 15 % vermikulit	1640	16,8	4,0	1,59
40 % Poraver + 15 % vermikulit	1480	16,6	3,6	1,15
40 % Geocell + 15 % vermikulit	1560	14,6	3,3	1,64
40 % W300 + 15 % vermikulit	1390	12,8	2,7	0,84

16.8 Etapa IV

Z optimalizačního výpočtu metodou párového srovnávání dle Fullera vychází jako nejvhodnější receptury s 40% a 60% náhradou plniva v podobě sklářského písku kamenivem Liapor, Poraver a sklopěnovým recyklátem Geocell (Tab. 28).

Tabulka 28: Vhodné receptury pro výrobu lehčené potěrové hmoty.

CEM I 42,5 R Hranice	19,25 %	CEM I 42,5 R Hranice	19,25 %
Popílek Dětmárovice	5,00 %	Popílek dětmárovice	5,00 %
Mikrosilika Sioxid Microsit	0,50 %	Mikrosilika Sioxid Microsit	0,50 %
plastifikátor Melment M10	0,05 %	plastifikátor Melment M10	0,05 %
plastifikátor Elotex FL 1200	0,20 %	plastifikátor Elotex FL 1200	0,20 %
Sklářský písek PR 32 Podivín	30%	Sklářský písek PR 32 Podivín	30%
Kamenivo Liapor 1/4 mm	45%	Sklopěnová drť Geocell	45%

Z optimalizačního výpočtu metodou kvantitativního párového srovnávání vychází jako nejvhodnější receptury s 40% a 60% náhradou plniva v podobě sklářského písku kamenivem Poraver a sklopěnovým recyklátem Geocell. Jako nejvhodnější byla na základě optimalizačního výpočtu a následného ekonomického zhodnocení vybrána receptura s 60 % obsahem plniva v podobě drceného sklopěnového recyklátu.

17 DISKUZE

Pro výrobu lehčené cementové potěrové hmoty byla zvolena řada lehčených plniv. Nejvhodnější lehčená plniva z oblasti druhotných surovin, kameniv z nich vyráběných a dále i kameniv vyráběných z přírodních látek byla vybrána na základě dostupnosti na trhu, prodejní ceny a objemové hmotnosti uváděné v technických listech surovin.

Pro srovnání základních vlastností nově vyvíjené potěrové hmoty byl proveden výběr potěrových hmot dostupných na trhu se zaměřením na lehčené cementové potěrové hmoty. Vybrána byla jediná potěrová hmota dostupná na trhu. Jedná se o lehčenou potěrovou hmotu třídy CT-C12-F3. Základní vlastností lehčené potěrové hmoty je její nízká objemová hmotnost $1\,100\text{ kg.m}^{-3}$. Snížením objemové hmotnosti cementového potěru zlepšujeme tepelně-izolační a akustické vlastnosti. Tato potěrová hmota byla informativně doplněna o nelehčené potěrové hmoty uváděné na trh výrobcem lehčené potěrové hmoty třídy CT-C12-F3. Jedná se o potěrové hmoty třídy CT-C20-F4, CT-C30-F5 a CT-C35-F5. Lehčená potěrová hmota CT-C12-F3 byla využita jako srovnávací receptura pro lehčenými plnivem modifikované potěrové směsi z důvodu srovnání nejvhodnější nově vyvinuté potěrové hmoty s hmotou dostupnou na trhu.

Vzhledem k využití lehčených plniv s odlišnou nasákavostí a zároveň různé granulometrii lehčených plniv, ovlivňující celkovou spotřebu cementového tmele na obalení plniva, byl vodní součinitel jednotlivých komerčních potěrových hmot a dále i referenčních a modifikovaných potěrových hmot stanoven na základě dosažení konzistence srovnatelné s konzistencí lehčené komerční potěrové hmoty v čerstvém stavu. Zkušební tělesa byla po dobu zrání potěrové hmoty laboratorně uložena z důvodu vlhkostního ošetřování těles s cementovou pojivovou bází.

Receptury suchých směsí pro výrobu lehčených potěrových hmot byly voleny na základě předešlých výzkumů fakulty stavební VUT Brno v oblasti cementových potěrových hmot, surovinové základny předpokládaného výrobce potěrové směsi, požadavky na cementové potěry, zpracovatelnost cementového potěru a s přihlédnutím na možnosti vylehčení potěrové hmoty. Využit byl CEM I 42,5 R původem Hranice a popílek původem Dětmárovice dle surovinové základny výrobce. Portlandský cement je zároveň vzhledem k nízkému obsahu alkálií vhodný pro přípravu cementového potěru s obsahem plniv umožňujících vznik alkalicko-křemičité reakce. Popílek také potlačuje

vznik alkalicko-křemičité reakce. Mechanismus potlačení alkalicko-křemičité reakce je zde založen především na měrném povrchu popílku a následným vyplněním vnitřního pórového systému. Dávka cementu byla stanovena na 25 %. Dávka cementu 25 % je nižší oproti předešlým výzkumům v oblasti potěrových hmot, a to vzhledem ke snížení tržní ceny výsledného produktu. Využito bylo množství cementu 340 kg.m^{-3} . Množství popílku nahrazujícího část cementu bylo v po rešerši literatur voleno v nejvyšší možné míře, tj. 20 %, kdy se popílek uplatňuje především ve formě pucolánu a ne jako mikroplnivo. Využitím popílku se snížila dávka cementu na 272 kg.m^{-3} . Náhradou cementu popílkem snižujeme celkové 28 denní pevnosti nově vytvořené potěrové hmoty. Popílek vykazuje pucolánové vlastnosti, které se projeví v pozdějším stádiu zrání než u cementových pojiv. S využitím popílku lze však docílit zvýšení pevnostních charakteristik zapříčiněných pucolánovou reakcí popílku do 90. dne zrání hmoty. Plnivo v podobě sklářského písku bylo vybráno vzhledem k zrnitosti vhodné pro výrobu potěrové hmoty a využití v surovinové základně výrobce. Sklářský písek byl procentuálně nahrazován lehčenými plnivy (Tab. 29).

Tabulka 29: Receptura referenční směsi

CEM I 42,5 R Hranice	25%
Popílek Dětmárovice	20% z m_c
Mikrosilika Sioxid Microsit	2% z m_c
plastifikátor Melment M10	0,2% z m_c
plastifikátor Elotex FL 1200	0,8% z m_c
Sklářský písek PR 32 Podivín	75%

Během náhrady sklářského písku lehčeným plnivem bylo nutné respektovat ideální křivku zrnitosti vzhledem ke snížení cementového tmele vyplňujícího prostor mezi jednotlivými zrny plniva a zároveň respektovat požadavek na omezení maximální velikosti zrna plniva potěrové hmoty na 4 mm. V případě plniva Geocell frakce 10 až 60 mm proběhla úprava drcením pomocí čelistového drtiče a následné třídění pomocí sady sít na zrna pod 4 mm a zrna nad 4 mm pro opětovné drcení. Během drcení plniva Geocell vzniká velké množství odpadních částic, využitelných pro přípravu jiných stavebních hmot. V případě lehčených plniv na trhu dostupných v různých frakcích byla preferována plniva zrnitosti 1 až 4 mm, a to s přihlédnutím na křivku zrnitosti sklářského písku, kdy byl nízký podíl sklářského písku frakce 1-4 mm doplňován zvýšeným podílem frakce 1-4 mm lehčeného kameniva a to opětovně vzhledem ke snížení množství cementového tmelu vyplňujícího prostory mezi zrny plniva.

Plnivo referenční receptury v podobě sklářského písku bylo nahrazováno kamenivem Liapor, expandovaným perlitem, expandovaným vermikulitem, lehčeným granulátem Poraver, sklopěnovou drtí Geocell, mikrosférami Omega-SPHERES W300 a lehčenými mikrosférami Q-CEL-7014.

Expandovaný perlit a vermikulit jsou lehčená kameniva dosahující nízkých objemových hmotností, ale zároveň se jedná o kameniva snižující výslednou pevnost celku. V případě expandovaného vermikulitu je nutné vzít v potaz červovitý tvar vermikulitu zapříčiněný procesem exfoliace, kdy expandovaný vermikulit vykazuje odlišné pevnostní vlastnosti v závislosti na poloze v tělese a na směru tlaků vyvíjených na těleso během pevnostních zkoušek. Poloha zrn je ovlivněna jak mísením jednotlivých složek, tak samotným hutněním čerstvého potěru, během kterého dochází k pohybu v závislosti na frekvenci hutnicího zařízení. Vzhledem k tvaru zrn expandovaného vermikulitu však není možné ovlivnit hutnicí procesy v takové míře, aby bylo dosaženo požadované polohy všech zrn obsažených v potěrové hmotě.

Mikrosféry jsou v dnešní době využívány ve stavebnictví v podobě plniva keramických a plastových výrobků. Jejich využitelnost v cementových směsích je omezena především vysokou cenou. Úprava popílku, tj. separace dutých zrn a případně následná úprava, je složitý technologický proces zvyšující samotnou cenu mikrosfér.

Z mikrosfér a expandovaných přírodních kameniv vermikulitu a perlitu byly připraveny zkušební tělesa pro srovnání vlivu lehčených kameniv na výsledné vlastnosti potěrové hmoty. Náhrada plniva v podobě sklářského písku (v případě expandovaného perlitu se jedná o přírodní kamenivo zrnitosti do 4 mm) probíhala v 5 %, 10 %, 15 % a 20 % z důvodu zjištění vlivu lehčeného plniva na potěrovou hmotu v závislosti na zvyšujícím se množství a zároveň k předpokládanému snížení pevnostních charakteristik při náhradě sklářského písku v množství vyšším 20 %.

Na základě výsledků pevnostních zkoušek, zjištěných objemových hmotností modifikovaných potěrových hmot a dále s přihlédnutím ke křivkám zrnitosti, bylo stanoveno využití expandovaného perlitu pouze v případě mísení expandovaného perlitu s kamenivem Liapor, a to maximálně do 10% obsahu expandovaného perlitu. Vyšší dávka expandovaného perlitu již neúměrně snižuje koeficient konstruktivnosti potěrové hmoty. Dále byla jako vhodná určena náhrada sklářského písku mikrosférami Q-CEL-7014, a to z důvodu dosažení požadované konzistence při nižším vodním součiniteli,

pozitivnímu vlivu na snížení objemové hmotnosti potěrové hmoty, a k předpokládaným pucolánovým vlastnostem zvyšujícím fyzikálně-mechanické vlastnosti po 90 dnech zrání potěrové hmoty.

Mikrosféry Omega-SPHERES W300 dosahují vlastností obdobných popílku. Ve srovnání s popílkiem však vykazují nižší objemové hmotnosti. Jedná se o popílek separovaný plavením. Přídavek mikrosfér Omega-SPHERES W300 se je nevhodný vzhledem k nutnosti zvýšit množství záměsové vody a zároveň k vysoké tržní ceně mikrosfér.

Experimentálně byla zkoušena i možnost náhrady sklářského písku v podobě expandovaného vermikulitu v maximálním množství 15 % v kombinaci s využitím 40% náhrady sklářského písku odlišným lehčeným plnivem. Množství 15 % expandovaného vermikulitu v potěrové směsi nepřímo vykazovalo nejvyšší pevnostní charakteristiky potěrové hmoty a zároveň snižovalo objemovou hmotnost potěrové hmoty.

Pro zjišťování pevnostních charakteristik potěrových hmot bylo využito zkoušek pevnosti v tlaku, pevnosti v tahu za ohybu a stanovení mikrotvrdosti povrchu. Výše uváděné zkoušky nejvíce charakterizují kohezní vlastnosti vnitřní struktury potěrové hmoty.

Náhrada sklářského písku probíhala v 20 %, 40 % a 60 %. Vzhledem k vysokému snížení zpracovatelnosti při náhradě sklářského písku lehčeným plnivem nad 60 % jsou tyto tři hodnoty nejvíce vhodné.

Zjištěné vlastnosti modifikovaných potěrových hmot posloužily jako podklad pro optimalizační výpočet, vyhodnocující nejvhodnější recepturu suché potěrové směsi. Prioritní pro optimalizační výpočet byla cena jednotlivých položek a dosažená objemová hmotnost cementové potěrové hmoty. V rámci ceny plniva byla do optimalizace vnesena i celková vzdálenost od výrobce, případně dodavatele, plniva k předpokládané výrobně suché potěrové směsi. Zároveň byly zahrnuty i požadavky na pevnostní charakteristiky potěrové hmoty, celková konstruktivnost hmoty a zpracovatelnost určená množstvím záměsové vody potřebným k dosažení požadované konzistence srovnatelné s referenční hmotou.

Využití mikrosiliky působí obdobně jako popílek pozitivně vůči alkalicko-křemičité reakci, tj. dochází k ucpání pórového systému hmoty a tím zároveň k omezení přístupu vlhkosti do konstrukce.

Podobně jako popeloviny i mikrosféry pozitivně ovlivňují výslednou mikrostrukturu potěrové hmoty. V případě plniva Geocell se z mikroskopického hlediska jedná o přesné kotvení zrn Geocellu v cementové matici, kdy dochází k dokonalému spojení plniva a pojiva.

Přídavek lehčených plniv snižuje výslednou objemovou hmotnost potěrové hmoty.

Reologie čerstvé potěrové hmoty v případě mikrosfér Omega-SPHERES W300 je ovlivněna především tvarem zrn a dále i jejich nasákavostí. V suché směsi tyto mikrosféry zabraňují soudržnosti částic. Odnímají však část záměsové vody a tím kompenzují tixotropní účinek mikrosfér Omega-SPHERES W300. Na reologii směsi má významný vliv užití mikrosfér Q-CEL-7014, je však nutné počítat s nutným rozptýlením segregovaných zrn. Zároveň mají na reologii směsi pozitivní účinek i plniva Geocell a Poraver, a to vzhledem k minimální povrchové nasákavosti zrn.

V diplomové práci byl prokázán negativní vliv lehčených plniv na pevnostní charakteristiky potěrové hmoty, kdy dochází ke snížení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku. Výjimku zde tvoří využití mikrosfér, u kterých je předpokládána pucolánová aktivita, respektive navýšení pevnostních charakteristik v pozdějším období zrání hmoty.

Vzhledem ke snižování objemové hmotnosti na úkor pevnostních charakteristik je vhodné prezentovat jednotlivé výsledky s ohledem na konstruktivnost potěrové hmoty. Využití popílku snižuje celkovou konstruktivnost ve 28. dnu zrání hmoty. Vzhledem k pucolánovým vlastnostem je však nutné uvést zvýšení konstruktivnosti během zrání hmoty. Obdobně je tomu v případě využití mikrosfér. S vyšším přídavkem plniva Geocell, Poraver a Liapor dochází k současnému zvýšení konstruktivnosti potěrové hmoty. Pouze v případě expandovaného vermikulitu dochází ke snížení konstruktivnosti hmoty a to především v závislosti na dosažené pevnosti v tlaku.

Dvě nejvhodnější modifikované receptury vybrané na základě optimalizačního výpočtu byly srovnány s vlastnostmi komerční lehčené potěrové hmoty a dopočteny předpokládané náklady na suroviny pro výrobu suché směsi pro výrobu lehčené cementové potěrové hmoty (Tab. 30).

Tabulka 30: Srovnání vlastností vybraných potěrových hmot

Receptura	φ_{zp} [kg.m ⁻³]	R_f [N.mm ⁻²]	R_C [N.mm ⁻²]	k_k [-]	SH [N.mm ⁻²]
REF	1910	4,4	18,1	0,95	2,68
R7 - 60 % Liapor	1240	3,3	16,7	1,35	1,88
R16 - 60 % Geocell	1700	4,3	20,5	1,21	2,78
CT-C12-F3	1100	3,6	10,9	0,99	1,20

Jedná se o recepturu s využitím odpadní látky v podobě 20 % náhrady cementu popílkem Dětmárovice, s obsahem kameniva Liapor v 60 % z původního sklářského písku, a recepturu s využitím upravované druhotné suroviny v podobě odpadního skla (sklopěnová drť Geocell, 60% náhrada sklářského písku), s 20% náhradou cementu popílkem Dětmárovice. Tyto receptury byly nejvíce výhodné vzhledem k odhadovaným nákladům na pořízení a zároveň ke snížení objemové hmotnosti cementového potěru a dále i k zachování srovnatelných pevnostních charakteristik s komerční lehčenou potěrovou hmotou.

18 ZÁVĚR

Vylehčení horizontálních konstrukcí staveb je doprovázeno nejen snížením objemové hmotnosti samotné konstrukce, ale zároveň dochází k zlepšení tepelně-izolačních a akusticko-izolačních vlastností konstrukce.

Momentálně jsou na trhu dostupná lehčená plniva vyráběná expanzí z přírodních materiálů a plniva průmyslově vyráběná z druhotných surovin aj.

V rámci této diplomové práce byly zkoumány především plniva ve formě expandovaného perlitu a vermikulitu, mikrosfér typu Q-CEL a Omega-SPHERES W, expandované odpady z obalových skel Poraver, Geocell a kamenivo Liapor.

Výsledky diplomové práce poukazují na výhodnost náhrady původního plniva ve formě sklářského písku kamenivem Liapor a dále kamenivem Poraver, a to z důvodu sférické tvarovosti těchto plniv umožňujících zlepšení zpracovatelnosti potěrové hmoty. Dále byl v diplomové práci prokázán vliv plniva Geocell na udržení požadovaných pevnostních charakteristik za současného snížení objemové hmotnosti hmoty. Ve srovnání s kamenivem Liapor plnivo Geocell nezvyšuje potřebné množství záměsové vody svou vnitřní nasákavostí, nýbrž tvarem vzniklým během zpracování plniva drcením.

Mikrosféry zlepšují pevnostní charakteristiky potěrové hmoty a zároveň byl prokázán jejich kladný tixotropní účinek během mísení komponent potěrové hmoty, a to hlavně v případě lehčených mikrosfér Q-CEL-7014. Nevýhodou mikrosfér je však jejich vysoká cena a problematická dostupnost na českém trhu. Zároveň dochází k odnětí části záměsové vody mikrosférami Omega-SPHERES W300 a ke shlukování mikrosfér Q-CEL-7014. Tyto jevy zvyšují ekonomickou náročnost na přípravu suché směsi pro výrobu potěrové hmoty.

Sklopěnová drť Geocell vykazuje i přes nutnost úpravy drcením a následným tříděním na požadovanou frakci ve srovnání s modifikovanými potěry srovnatelné výsledky pevnostních zkoušek. Zároveň mají ve srovnání s ostatními plnivy nejnižší odhadovanou cenu 2 050 Kč.t⁻¹.

V diplomové práci byla také prokázána vhodnost náhrady plniva v podobě sklářského písku do 60 % kamenivem Liapor. Směs je ekonomicky srovnatelná se směsí

s využitím plniva Geocell. Při vyšším podílu kameniva Liapor snižujeme zpracovatelnost, což se následně zobrazí ve snížení pevnostních charakteristik. Do 60 % obsahu kameniva Liapor vykazuje potěrová hmota výborné pevnostní vlastnosti a nejnížší objemovou hmotnost ve srovnání s ostatními lehčeným plnivem modifikovanými potěrovými hmotami.

Nevýhodou sklopěnového granulátu Poraver je vysoká pořizovací cena 26 000 Kč.t⁻¹. Nejméně vhodné je využití mikrosfér, kdy odhadovaná cena převyšuje 90 000 Kč.t⁻¹. Odhadovaná cena surovin pro výrobu lehčené potěrové hmoty s obsahem kameniva Liapor činí 2 440 Kč.t⁻¹. V receptuře s využitím kameniva Liapor se však nachází odpadní látka pouze v podobě popílku Dětmárovice. Z ekonomického hlediska je nevhodnější receptura s 60% náhradou sklárského písku drtí ze sklopěnového recyklátu Geocell. Odhadovaná cena na pořízení vstupních surovin pro výrobu této nejlevnější receptury ze zkoušených modifikovaných směsí činí 2 010 Kč.t⁻¹.

Z výsledků diplomové práce byly vyhodnoceny nevhodnější surovinové skladby pro výrobu suché potěrové směsi s obsahem kameniva vyráběným z přírodních materiálů a pro výrobu suché potěrové směsi s obsahem plniva v podobě upravované odpadní látky.

Nejvhodnější je využít kameniva Liapor jako 60% náhrady sklárského písku, a to vzhledem k nejnížší objemové hmotnosti potěrové hmoty při srovnatelné zpracovatelnosti s ostatními modifikovanými hmotami a zároveň při zachování vysokých pevností hmoty.

V diplomové práci bylo řešeno především využití plniva z druhotných surovin. Při využití plniva v podobě druhotné suroviny a surovin z nich vyráběných je vhodné využít sklopěnového plniva Geocell v množství 60 %. Plnivo Geocell snižuje objemovou hmotnost hmoty, náklady na vstupní suroviny a také potěrové hmoty s obsahem plniva Geocell vykazují přijatelné pevnostní charakteristiky.

LITERATURA

- [1] POPONKOVÁ, M.: prezentace „*Technologie staveb*“ katedry Technologie staveb ČVUT, dostupné z <http://technologie.fsv.cvut.cz>
- [2] SVOBODA, L.: „*Stavební hmoty*“, ISBN 978-80-8076-057-1
- [3] TŮMA, P.: „*Podlahové potěry a časté příčiny jejich poruch*“, článek z 28. 12. 2009, dostupný z <http://www.imaterialy.cz>
- [4] RŮŽIČKA, M.: „*Podlahová konstrukce v dřevostavbě jako akumulární vrstva*“, článek z 08. 04. 2011, dostupný z <http://www.imaterialy.cz>
- [5] HELA, R.: „*Technologie betonu II*“, Brno 2007
- [6] PÍCHA, F.: „*Expandované stavební hmoty*“, Sborník geologických věd, 1961
- [7] VACHUŠKA, V.: „*EPD pro umělé kamenivo Rugen RU*“, 1. Odborný seminář Environmentální prohlášení o produktu se zaměřením na oblast stavebnictví, Praha 20. 01, 2010
- [8] Technický list kamenivo Rugen RU dostupný z www.ekostat.cz
- [9] MATULOVÁ P., MELICHAR T., PŘIKRYL J.: „*Substituce pojiva v cementových kompozitech jemně mletou recyklovanou sklovinou s ohledem na životní prostředí*“, Časopis Beton TKS 3/2009
- [10] MATOUŠEK, M.: „*Lehké stavební látky II*“, Praha: SNTL, 1985, 3. opr. vyd.
- [11] DROCHYTKA, R.: „*Lehké stavební látky*“, studijní opora VUT v Brně, 2006
- [12] HELA, R.: „*Technologie betonu I*“, Brno 2005
- [13] FRIDRICHOVÁ, M.: přednášky předmětu „*Maltoviny I*“, akademický rok 2009
- [14] ROVNANÍKOVÁ, P.: „*Stavební chemie, modul 2, Anorganická chemie a chemie stavebních materiálů*“, Brno, Akademické nakladatelství CERM, 2005, Vyd.1., ISBN 80-7204-409-5
- [15] NEVŘIVOVÁ, L.: „*Cenosféry, nová možnost lehčení žárovzdorných materiálů*“, příspěvek s podporou vědeckovýzkumného záměru VVZ MSM 261100008
- [16] BODNÁROVÁ, L.: „*Kompozitní materiály ve stavebnictví*“, Brno, Akademické nakladatelství CERM, 2002, 122s., ISBN 80-214-2266-1
- [17] BRIATKA, P., MAKÝŠ P.: „*Možno účinne použiť pórovité kamenivo na vnútorné ošetrovanie betónu?*“ Beton TKS, číslo 4/2011, BETON TKS, S. R. O., ISSN 1213311b
- [18] BYDŽOVSKÝ, J.: Přednášky předmětu „*Vybrané statě z technologie stavebních hmot*“, akademický rok 2010
- [19] Heidelberg Cement: „*Příručka technologa: Beton: Suroviny – výroba – vlastnosti*“, Druhé aktualizované vydání 2005, dostupné na „www.heidelbergcement.cz“
- [20] SVOBODA, L.: „*Granulometrie částicových plniv pro vytvrditelné kompozity*“, článek v časopise Chemagazín, číslo 4, ročník 2010
- [21] BROŽOVSKÝ, J., DROCHYTKA R., BYDŽOVSKÝ, J., DUFKA, A.: „*Výzkumná zpráva za rok 2007 v rámci řešení projektu MPO*“ v programu TANDEM FT-TA3/148 Výzkum a vývoj diagnostiky povrchů pozemních komunikací s návrhem řešení metodiky údržby a oprav pro správce pozemních komunikací v ČR: Výzkum betonu pro opravy cementobetonových ploch“, 14. 12. 2007

[22] DROCHYTKA, R., BYDŽOVSKÝ J., ŽIŽKOVÁ N., JURÁNKOVÁ, E.,
KŘUPALA, J.: „Zkoušky vzájemné interakce zvolených plniv a druhotných surovin“
Výzkumná zpráva č. 06/11 za rok 2011 v rámci řešení projektu FR-TI3/742
Systém lehčených hmot pro dokončování staveb s druhotnými surovinami.

- [URL 1] <http://termosystem.manolodesign.cz/>
- [URL 2] Odborný článek publikovaný ESCSI, dostupný z <http://www.escsi.org/>
- [URL 3] www.grena.cz
- [URL 4] www.perlit.cz
- [URL 5] www.nagara.cz
- [URL 6] www.liaver.com
- [URL 7] www.refaglass.cz
- [URL 8] www.odlucovace-nadrze.cz
- [URL 9] <http://www.nationalslag.org>
- [URL 10] <http://kgs.uky.edu>
- [URL 11] <http://www.omegaminerals.de/>
- [URL 12] <http://www.soa.utexas.edu>

UVÁDĚNÉ TECHNICKÉ PŘEDPISY

ČSN	EN	450	„Popílek do betonu“
ČSN	EN	12620	„Kamenivo do betonu“
ČSN	EN	13318	„Potěrové materiály a podlahové potěry – Definice“
ČSN	EN	13813	„Potěrové materiály a podlahové potěry – Potěrové materiály – Vlastnosti a požadavky“
ČSN	EN	13943	„Požární bezpečnost – Slovník“
ČSN	EN	730823	„Požárně technické vlastnosti hmot. Stupeň hořlavosti stavebních hmot“
ČSN	EN	744505	„Podlahy – společná ustanovení“
ČSN	EN	1015	„Zkušební metody malt pro zdivo - Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)“
ČSN	EN	1097	„Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva“
ČSN	EN	13055	„Pórovité kamenivo“
ČSN	EN	13501	„Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb“
ČSN	EN	13892	„Zkušební metody potěrových materiálů“
ČSN	EN	730532	„Akustika - Ochrana proti hluku v budovách a posuzování akustických vlastností stavebních výrobků – Požadavky“
ČSN	EN	933	„Zkoušení geometrických vlastností kameniva“
ČSN	EN	993	„Zkušební metody pro žáruvzdorné výrobky tvarové hutné“

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

AKR	alkalicko-křemičitá reakce
AR	alkáliové rozpínání
AUR	alkalicko-uhličitá reakce
F_i	váha kritéria dle výpočtu podle Fullera
f_i	váha kritéria dle výpočtu podle Saatiho
JAOM	jemné anorganické odpadní materiály
k_k	koeficient konstruktivnosti
pH	součinitel tepelné vodivosti
P_i	pořadí kritéria
R_C	odolnost vůči otěru dle zkoušky podle Böhme
R_f	objemová hmotnost zatvrdlé potěrové hmoty
$R_{i,j}$	vodní součinitel
SH	mikrotvrdost povrchu
$S_{i,j}$	relativní důležitost kritéria
VEP	vedlejší energetický produkt
V_i	počet preferencí
W	vodní součinitel
ZŽ	ztráta žíháním
Λ	součinitel tepelné vodivosti
Σ	součet
φ_{ZP}	objemová hmotnost zatvrdlé potěrové hmoty

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Rozdělení potěrů dle typu funkce .	5
Obrázek 2: Odlišnosti vytápěcích anhydritových a cementových potěrů.....	6
Obrázek 3: Efekt samoošetřování.	7
Obrázek 4: Vermikulit Medium.....	8
Obrázek 5: Expandovaný perlit EP 180.....	9
Obrázek 6: Plnivo SioPor, řez.....	9
Obrázek 7: Kamenivo Liapor 1/4 mm	9
Obrázek 8: Struska AMT 0-2 mm.	10
Obrázek 9: Lupek.....	10
Obrázek 10: Kamenivo Rugen RU	11
Obrázek 11: Plnivo Liaver	11
Obrázek 12: Plnivo Poraver.....	12
Obrázek 13: Expandovaný skelný odpad Refaglass.	12
Obrázek 14: Expandovaný skelný odpad Geocell – drť.	13
Obrázek 15: Lehčená struska	13
Obrázek 16: Mikrosféry firmy Omega.	14
Obrázek 17: Reakce amorfního SiO_2	18
Obrázek 18: Höpplerův konzistometr.....	43
Obrázek 19: Těleso při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu.....	45
Obrázek 20: Těleso při zkoušce pevnosti v tlaku.	45
Obrázek 21: CT-C20-F4, suchá směs.	48
Obrázek 22: CT-C35-F5, zbytek na sítu 0,25 mm.....	48
Obrázek 23: Řezy zkušebními tělesy.....	86
Obrázek 24: Lehčená plniva.	87

Obrázek 25: Modifikovaná receptura s kamenivem Liapor	75
Obrázek 26: Zkušební těleso s využitím kameniva Poraver - foceno 28 den zrání.....	77
Obrázek 27: Detail kotvení zrn Geocell v matrici potěrové hmoty	77
Obrázek 28: Rozpad vzorku s 40 % Q-CEL-7014, 15 % expandovaného vermikulitu a 45 % sklářského písku	89

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Třídy hořlavosti stavebních hmot dle tříd reakcí na oheň.	3
Tabulka 2: Požadavky na vlhkost potěrů při pokládce dle ČSN EN 74 4505.	4
Tabulka 3: Cenoféry.	14
Tabulka 4: Propady sítím při zrnitosti dle Fullera.	27
Tabulka 5: Použité zkušební postupy.	32
Tabulka 6: Technické údaje komerčních potěrových hmot.	47
Tabulka 7: Sítový rozbor komerční potěrové hmoty třídy CT-C35-F5.	49
Tabulka 8: Sítový rozbor komerční potěrové hmoty třídy CT-C30-F5.	49
Tabulka 9: Sítový rozbor komerční potěrové hmoty třídy CT-C20-F4.	50
Tabulka 10: Sítový rozbor komerční potěrové hmoty třídy CT-C12-F4.	51
Tabulka 11: Výsledky měření součinitele tepelné vodivosti komerčních potěrových hmot.	54
Tabulka 12: Základní vlastnosti vybraných plniv.	59
Tabulka 13: Základní vlastnosti vybraných mikrosfér.	60
Tabulka 14: Výsledky chemického rozboru prováděného na komerčních směsích.	73
Tabulka 15: Stanovení odolnosti proti obrušování vybraných modifikovaných potěrových hmot.	74
Tabulka 16: Výsledky zkoušek na modifikovaných potěrových hmotách.	79
Tabulka 17: Optimalizační kritéria.	80
Tabulka 18: Optimalizační kritéria dle důležitosti.	80
Tabulka 19: Kombinovaná cena plniv a kombinovaná vzdálenost plniv dodavatel-odběratel.	81
Tabulka 20: Fullerův trojúhelník.	82
Tabulka 21: Váhy kritérií pro optimalizační výpočet dle Fullera.	82
Tabulka 22: Výsledky optimalizačního výpočtu dle Fullera.	83

Tabulka 23: Saatiho rozhodovací matice a výpočet váhy kritérií.....	84
Tabulka 24: Výsledky kvantitativního párového srovnávání hodnot dle Saatiho.	84
Tabulka 25: Výsledky zkoušek na komerčních potěrech.	87
Tabulka 26: Výsledky měření na referenčních recepturách.	89
Tabulka 27: Výsledky měření na modifikovaných tělesech.	90
Tabulka 28: Vhodné receptury pro výrobu lehčené potěrové hmoty.	90
Tabulka 29: Receptura referenční směsi.....	93
Tabulka 30: Srovnání vlastností vybraných potěrových hmot	97

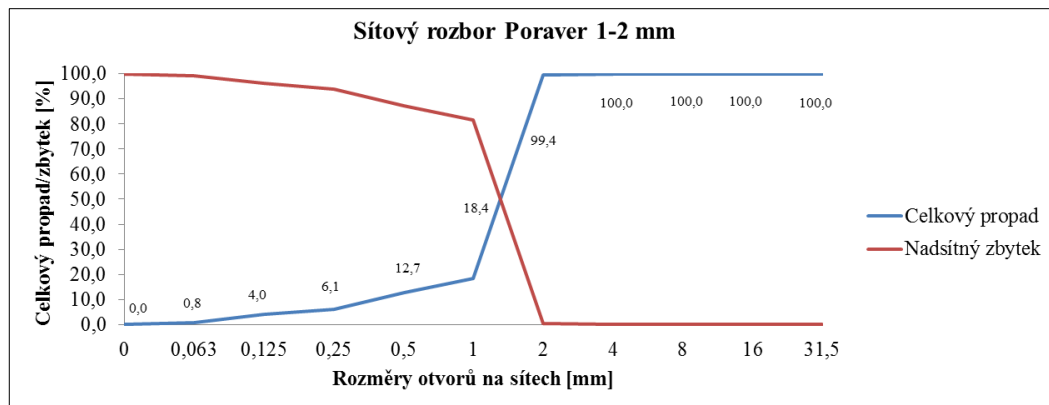
SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Vliv množství popílku v hutném plnivu na objemovou hmotnost betonu.	17
Graf 2: Křivka zrnitosti 0,25 - 4 mm dle Fullera.	22
Graf 3: Sítový rozbor komerční potěrové hmoty třídy CT-C35-F5.....	48
Graf 4: Sítový rozbor komerční potěrové hmoty třídy CT-C30-F5.....	49
Graf 5: Sítový rozbor komerční potěrové hmoty třídy CT-C20-F4.....	50
Graf 6: Sítový rozbor komerční potěrové hmoty třídy CT-C12-F4.....	50
Graf 7: Objemová hmotnost komerčních potěrových hmot.	51
Graf 8: Mikrotvrdost povrchu komerčních potěrových hmot.....	52
Graf 9: Srovnání pevností v tahu za ohybu komerčních potěrových hmot.	53
Graf 10: Srovnání pevností v tlaku komerčních potěrových hmot.	53
Graf 11: Srovnání konstruktivnosti komerčních potěrových hmot.	54
Graf 12: Difraktometrický rozbor kameniva Liapor.....	60
Graf 13: Difraktometrický rozbor expandovaného vermikulitu.	61
Graf 14: Difraktometrický rozbor mikrosfér Omega-SPHERES W300	61
Graf 15: Difraktometrický rozbor expandovaného perlitu.	62
Graf 16: Difraktometrický rozbor mikrosfér Q-CEL-7014.	62
Graf 17: Vodní součinitel potěrové hmoty - průzkum vlivu náhrady plniva expandovaným perlitem.....	64
Graf 18: Objemová hmotnost potěrové hmoty - průzkum vlivu náhrady přírodního plniva expandovaným perlitem.....	64
Graf 19: Pevnost v tlaku potěrové hmoty - průzkum vlivu náhrady plniva expandovaným perlitem.....	65
Graf 20: Koeficient konstruktivnosti potěrové hmoty - průzkum vlivu náhrady plniva expandovaným perlitem.....	65

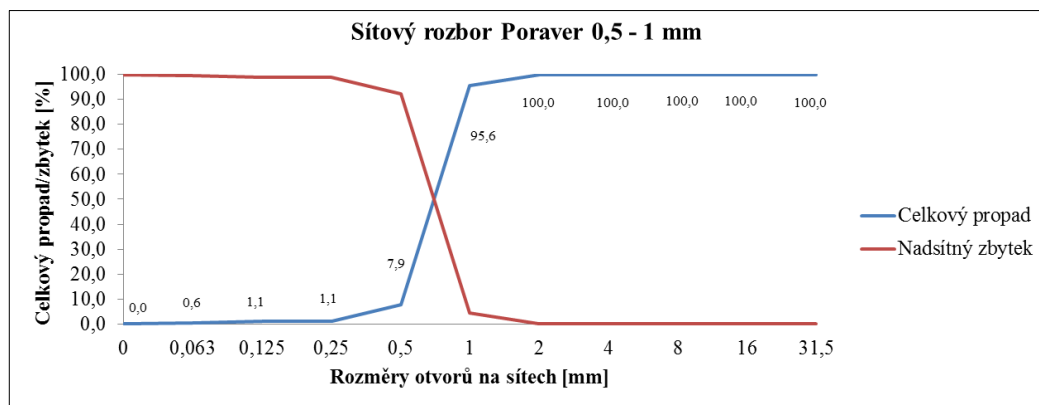
Graf 21: Vodní součinitel při výrobě potěrové hmoty - průzkum vlivu náhrady plniva expandovaným perlitem.....	68
Graf 22: Změna objemové hmotnosti při náhradě sklářského písku lehčeným plnivem.	69
Graf 23: Změna pevnosti v tlaku potěrové hmoty při náhradě sklářského písku lehčeným plnivem.....	69
Graf 24: Změna pevnosti v tahu za ohybu potěrové hmoty při náhradě sklářského písku lehčeným plnivem.....	70
Graf 25: Změna konstruktivnosti potěrové hmoty při náhradě sklářského písku lehčeným plnivem.....	71
Graf 26: Objemová hmotnost modifikovaných těles.....	74
Graf 27: Pevnost v tlaku modifikovaných těles.....	75
Graf 28: Pevnost v tahu za ohybu modifikovaných těles	76
Graf 29: Koeficient konstruktivnosti modifikovaných těles.....	76
Graf 30: Mikrotvrdost povrchu modifikovaných těles	77
Graf 31: Odolnost proti obrušování stanovovaná na vybraných modifikovaných tělesech ..	78

PŘÍLOHA A: GRANULOMETRIE PLNIV

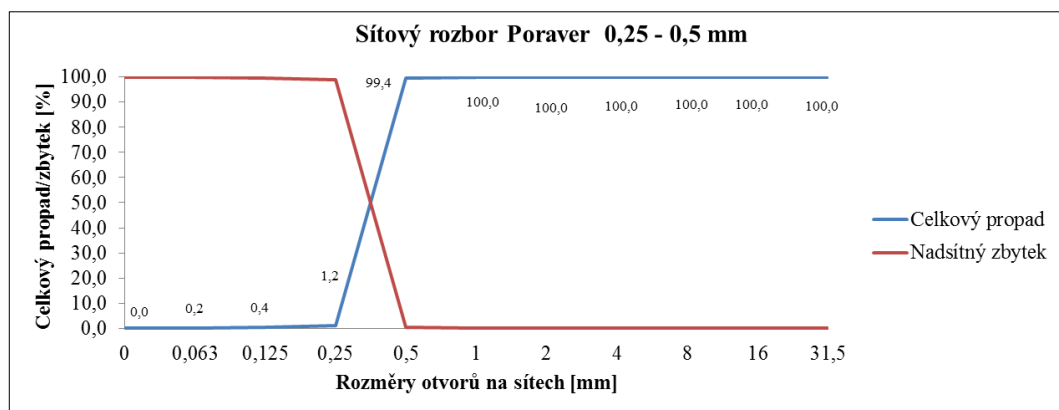
Granulometrie – Poraver



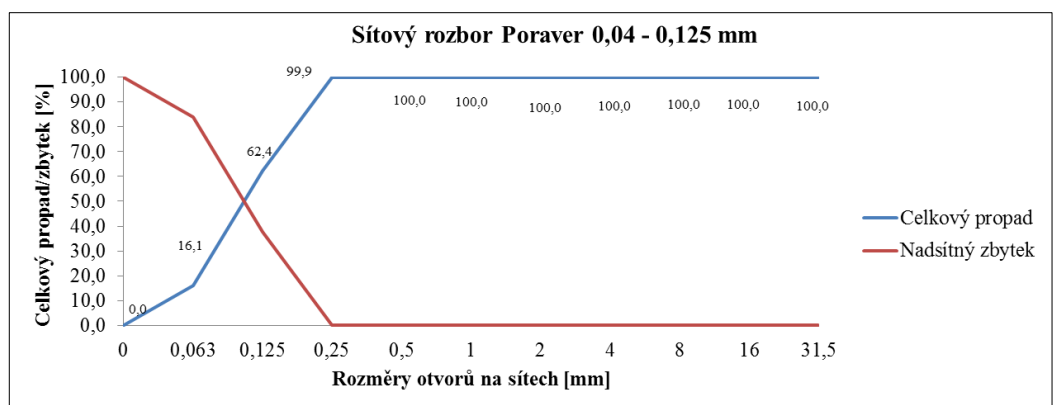
Rozměry otvorů na sítích [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na sítě [g]	0,8	3,2	2,1	6,7	5,7	81,3	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	100,4
Váhový zbytek na sítě [%]	0,8	3,2	2,1	6,7	5,7	81,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	
Nadsítový zbytek [%]	100,0	99,2	96,0	93,9	87,3	81,6	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	0,8	4,0	6,1	12,7	18,4	99,4	100,0	100,0	100,0	100,0	



Rozměry otvorů na sítích [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na sítě [g]	0,6	0,5	0,0	6,8	87,9	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,2
Váhový zbytek na sítě [%]	0,6	0,5	0,0	6,8	87,7	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Nadsítový zbytek [%]	100,0	99,4	98,9	98,9	92,1	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	0,6	1,1	1,1	7,9	95,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

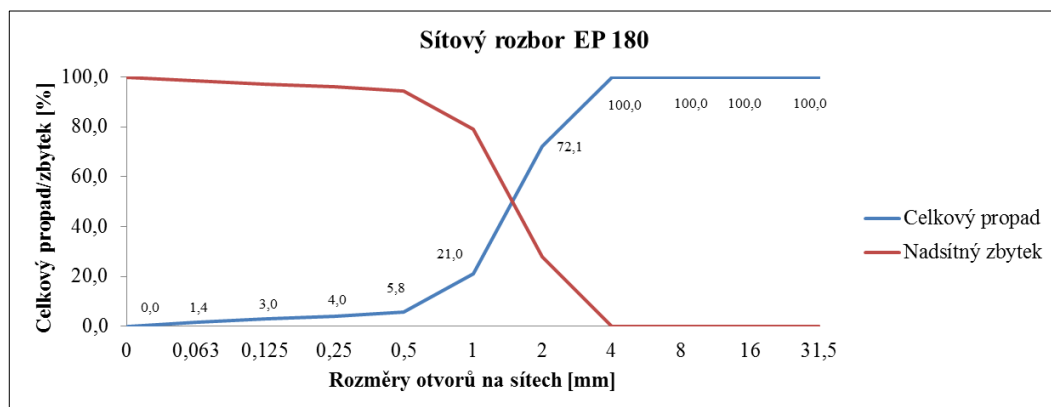


Rozměry otvorů na sítě [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na sítě [g]	0,2	0,2	0,8	98,5	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,3
Váhový zbytek na sítě [%]	0,2	0,2	0,8	98,2	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Nadsitný zbytek [%]	100,0	99,8	99,6	98,8	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	0,2	0,4	1,2	99,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

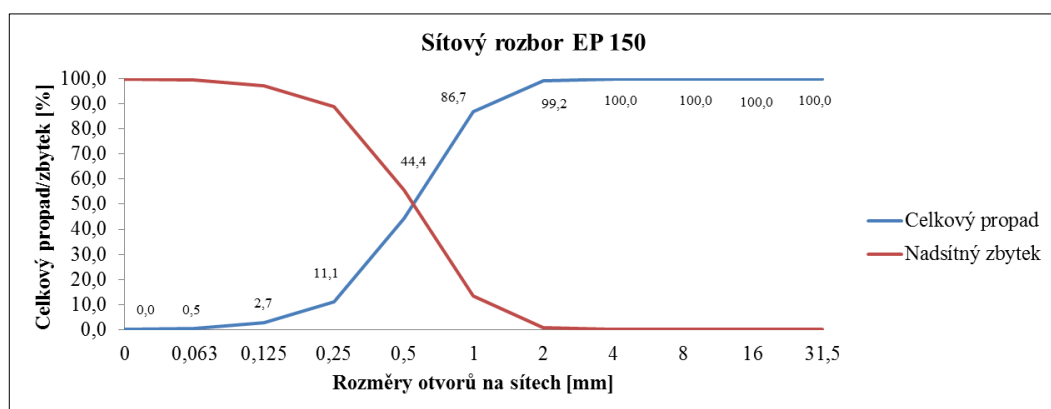


Rozměry otvorů na sítě [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na sítě [g]	16,2	46,4	37,7	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,4
Váhový zbytek na sítě [%]	16,1	46,2	37,5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Nadsitný zbytek [%]	100,0	83,9	37,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	16,1	62,4	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

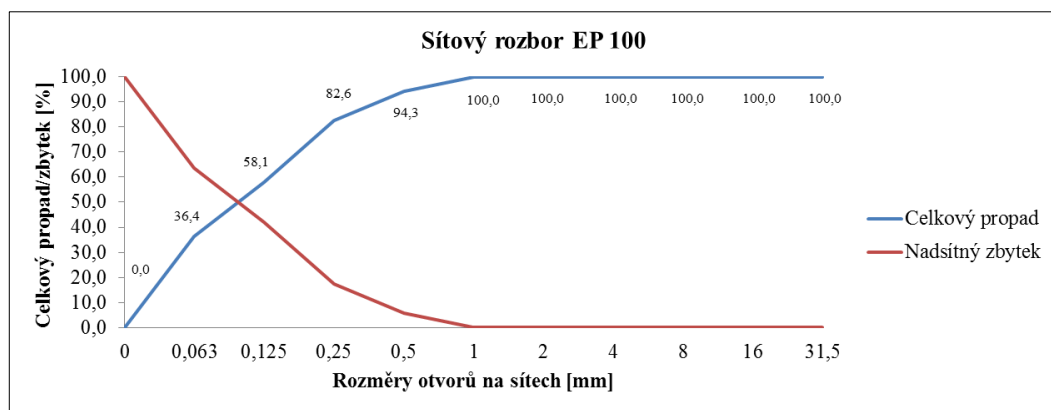
Granulometrie expandovaného perlitu.



Rozměry otvorů na sítích [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na sítě [g]	1,5	1,6	1,0	1,8	15,3	51,3	28,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,4
Váhový zbytek na sítě [%]	1,4	1,6	1,0	1,8	15,2	51,1	27,9	0,0	0,0	0,0	0,0	
Nadsitný zbytek [%]	100,0	98,6	97,0	96,0	94,2	79,0	27,9	0,0	0,0	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	1,4	3,0	4,0	5,8	21,0	72,1	100,0	100,0	100,0	100,0	

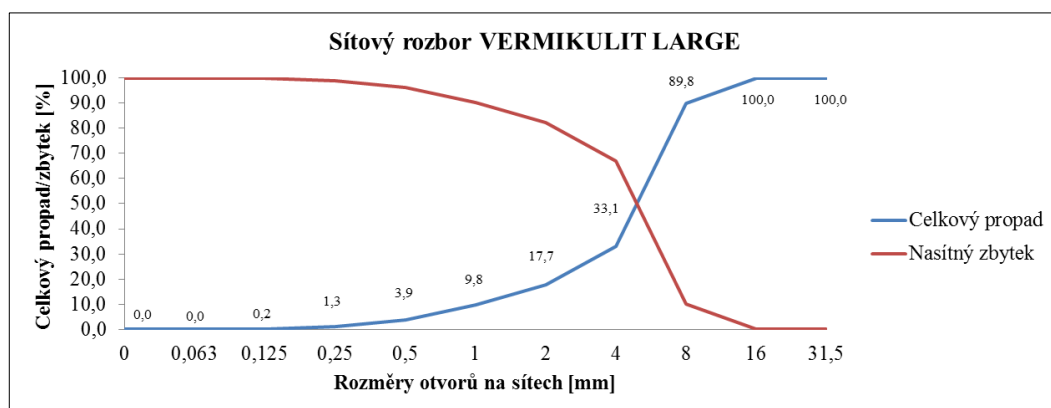


Rozměry otvorů na sítích [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na sítě [g]	0,5	2,2	8,5	33,6	42,7	12,6	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	100,9
Váhový zbytek na sítě [%]	0,5	2,2	8,4	33,3	42,3	12,5	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	
Nadsitný zbytek [%]	100,0	99,5	97,3	88,9	55,6	13,3	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	0,5	2,7	11,1	44,4	86,7	99,2	100,0	100,0	100,0	100,0	

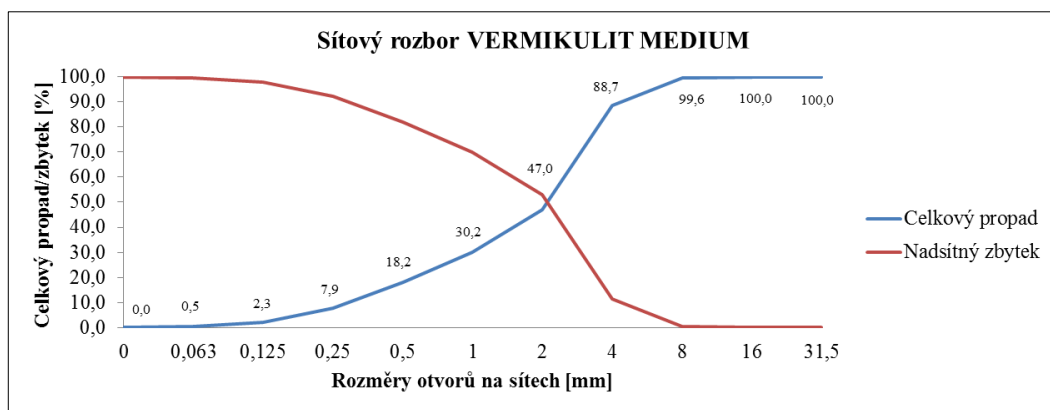


Rozměry otvorů na sítích [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na sítě [g]	36,5	21,8	24,6	11,8	5,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,4
Váhový zbytek na sítě [%]	36,4	21,7	24,5	11,8	5,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Nadsitný zbytek [%]	100,0	63,6	41,9	17,4	5,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	36,4	58,1	82,6	94,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

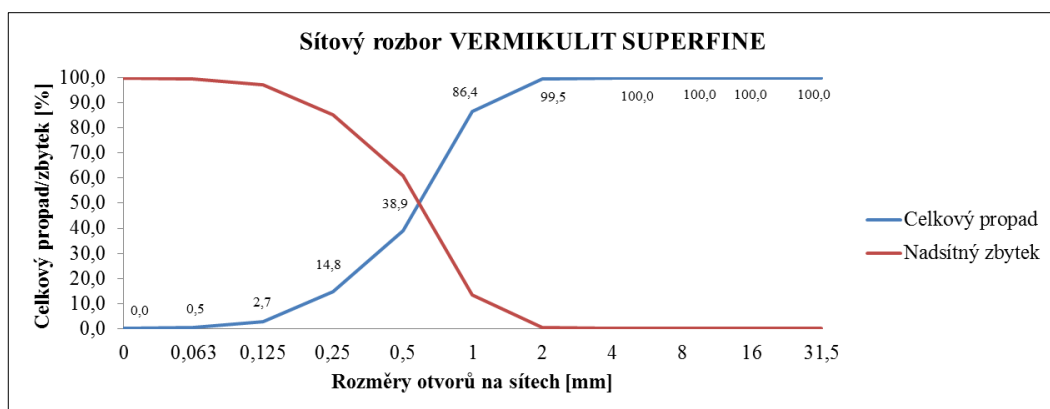
Granulometrie expandovaného vermikulitu.



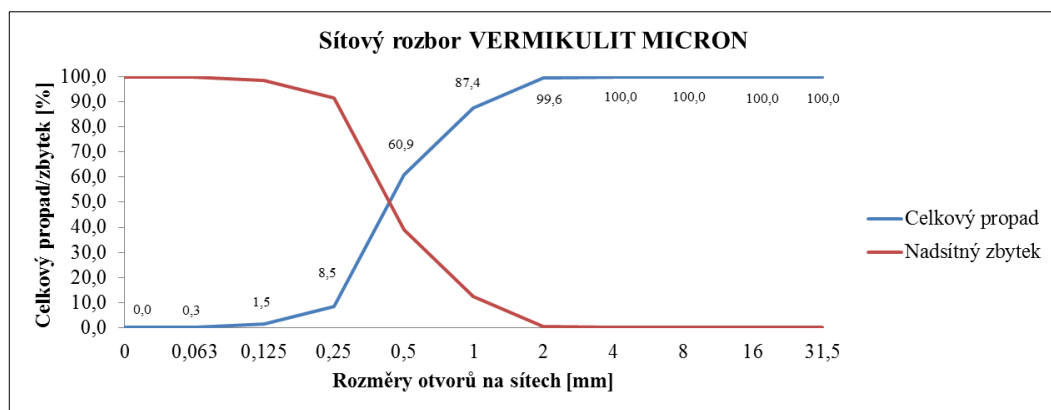
Rozměry otvorů na sítích [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na sítě [g]	0,0	0,3	1,6	3,9	9,0	11,8	23,1	85,3	15,3	0,0	0,0	150,3
Váhový zbytek na sítě [%]	0,0	0,2	1,1	2,6	6,0	7,9	15,4	56,8	10,2	0,0	0,0	
Nasitný zbytek [%]	100,0	100,0	99,8	98,7	96,1	90,2	82,3	66,9	10,2	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	0,0	0,2	1,3	3,9	9,8	17,7	33,1	89,8	100,0	100,0	



Rozměry otvorů na sítích [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na sítě [g]	0,8	2,6	8,4	15,5	18,1	25,2	62,7	16,4	0,6	0,0	0,0	150,3
Váhový zbytek na sítě [%]	0,5	1,7	5,6	10,3	12,0	16,8	41,7	10,9	0,4	0,0	0,0	
Nadsítový zbytek [%]	100,0	99,5	97,7	92,1	81,8	69,8	53,0	11,3	0,4	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	0,5	2,3	7,9	18,2	30,2	47,0	88,7	99,6	100,0	100,0	

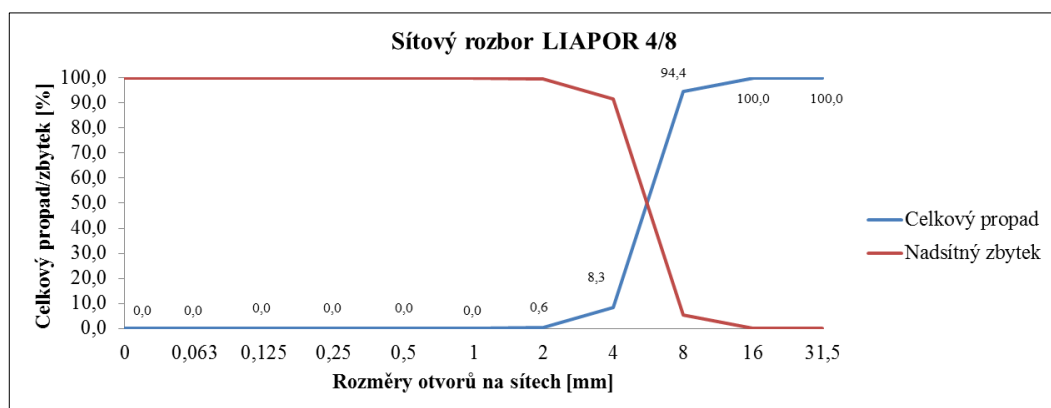


Rozměry otvorů na sítích [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na sítě [g]	0,5	2,2	12,1	24,2	47,6	13,1	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	100,2
Váhový zbytek na sítě [%]	0,5	2,2	12,1	24,2	47,5	13,1	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	
Nadsítový zbytek [%]	100,0	99,5	97,3	85,2	61,1	13,6	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	0,5	2,7	14,8	38,9	86,4	99,5	100,0	100,0	100,0	100,0	

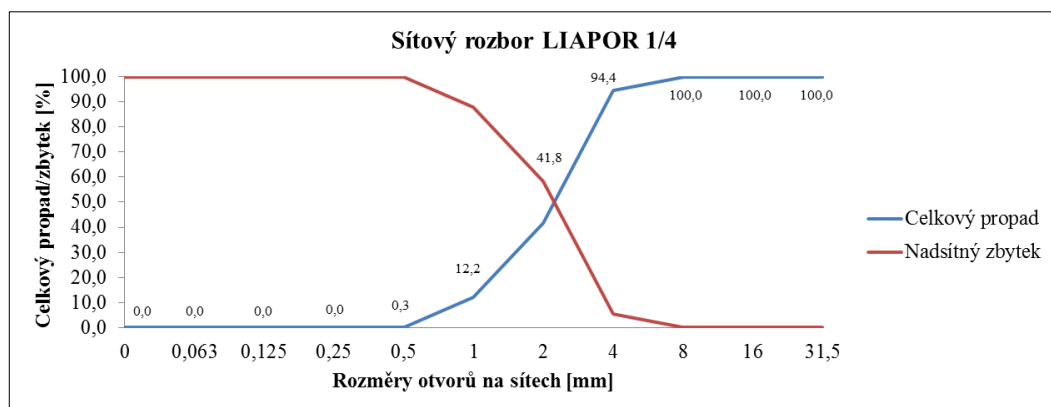


Rozměry otvorů na sítích [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na sítě [g]	0,3	1,2	7,0	52,5	26,6	12,2	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	100,2
Váhový zbytek na sítě [%]	0,3	1,2	7,0	52,4	26,5	12,2	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	
Nadsítný zbytek [%]	100,0	99,7	98,5	91,5	39,1	12,6	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	0,3	1,5	8,5	60,9	87,4	99,6	100,0	100,0	100,0	100,0	

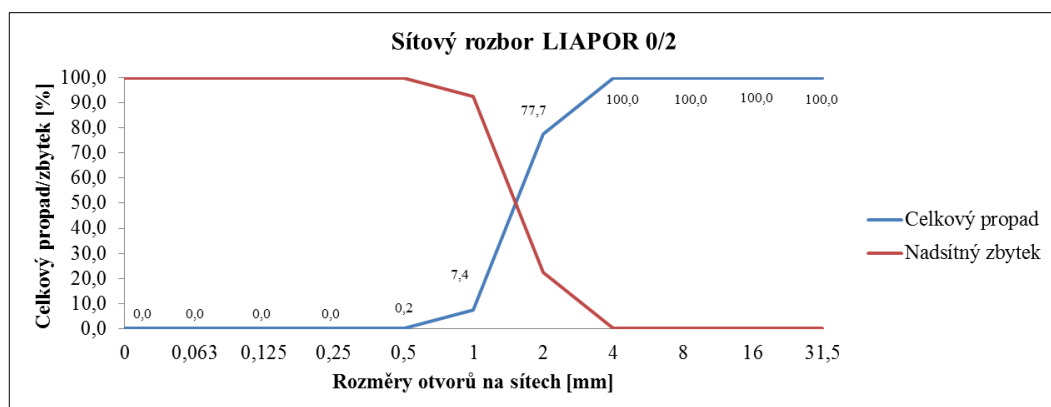
Granulometrie Liaporu.



Rozměry otvorů na sítích [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na sítě [g]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	15,5	172,9	11,3	0,0	0,0	200,9
Váhový zbytek na sítě [%]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	7,7	86,1	5,6	0,0	0,0	
Nadsítný zbytek [%]	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,4	91,7	5,6	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	8,3	94,4	100,0	100,0	

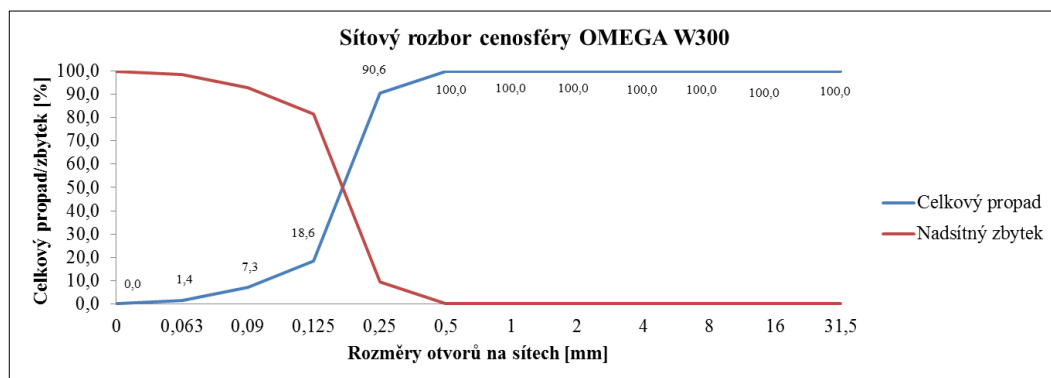


Rozměry otvorů na sítích [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na sítě [g]	0,0	0,0	0,0	0,6	23,9	59,4	105,8	11,2	0,0	0,0	0,0	200,9
Váhový zbytek na sítě [%]	0,0	0,0	0,0	0,3	11,9	29,6	52,7	5,6	0,0	0,0	0,0	
Nadsítový zbytek [%]	100,0	100,0	100,0	100,0	99,7	87,8	58,2	5,6	0,0	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	12,2	41,8	94,4	100,0	100,0	100,0	



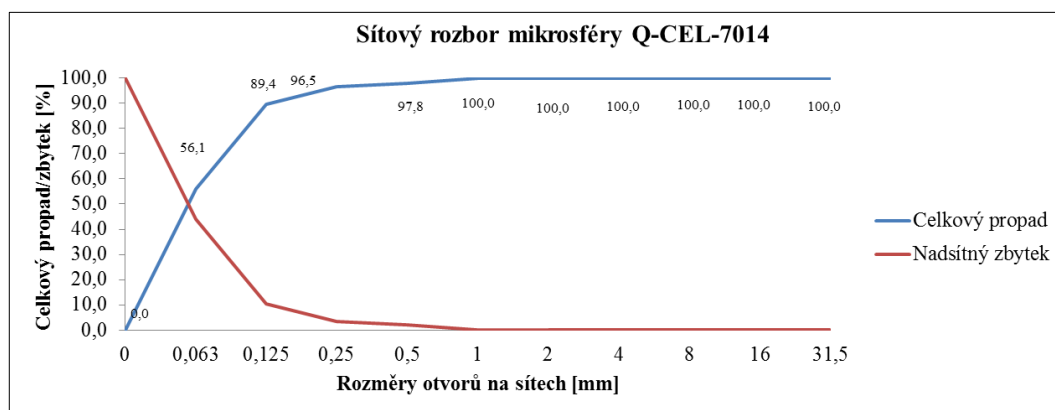
Rozměry otvorů na sítích [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na sítě [g]	0,0	0,0	0,0	0,5	14,3	141,0	44,8	0,0	0,0	0,0	0,0	200,6
Váhový zbytek na sítě [%]	0,0	0,0	0,0	0,2	7,1	70,3	22,3	0,0	0,0	0,0	0,0	
Nadsítový zbytek [%]	100,0	100,0	100,0	100,0	99,8	92,6	22,3	0,0	0,0	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	7,4	77,7	100,0	100,0	100,0	100,0	

Granulometrie mikrosfěr Omega-SPHERES W300.



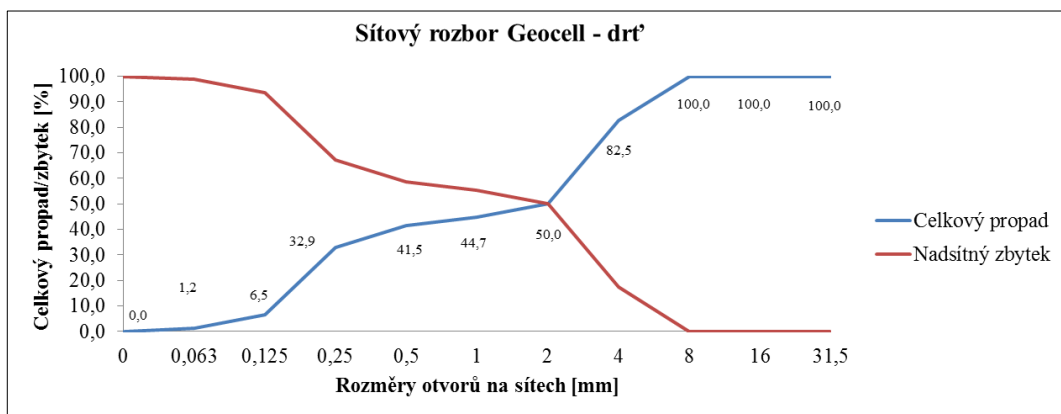
Rozměry otvorů na sítích [mm]	0	0,063	0,09	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na sítě [g]	1,4	5,9	11,3	72,1	9,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,1
Váhový zbytek na sítě [%]	1,4	5,9	11,3	72,0	9,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Nadsitný zbytek [%]	100,0	98,6	92,7	81,4	9,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	1,4	7,3	18,6	90,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

Granulometrie mikrosfěr Q-CEL-7014



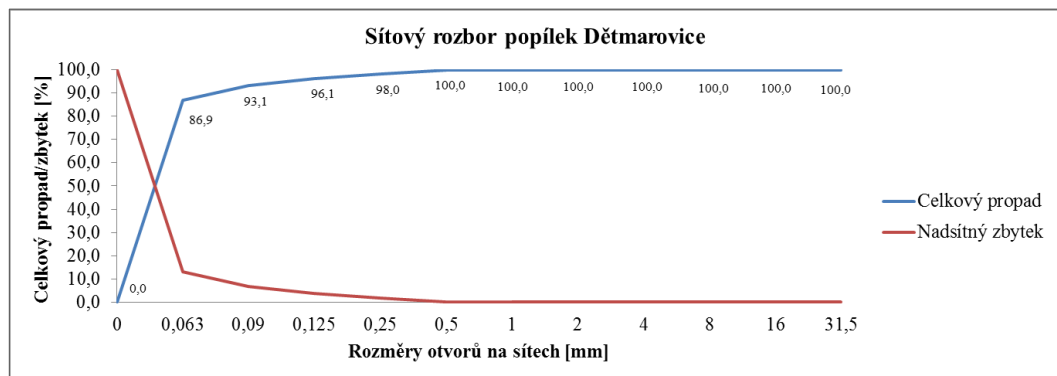
Rozměry otvorů na sítích [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na sítě [g]	56,1	33,3	7,1	1,3	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,9
Váhový zbytek na sítě [%]	56,2	33,3	7,1	1,3	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Nadsitný zbytek [%]	100,0	43,8	10,5	3,4	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	56,2	89,5	96,6	97,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

Granulometrie drceného pěnového skla Geocell



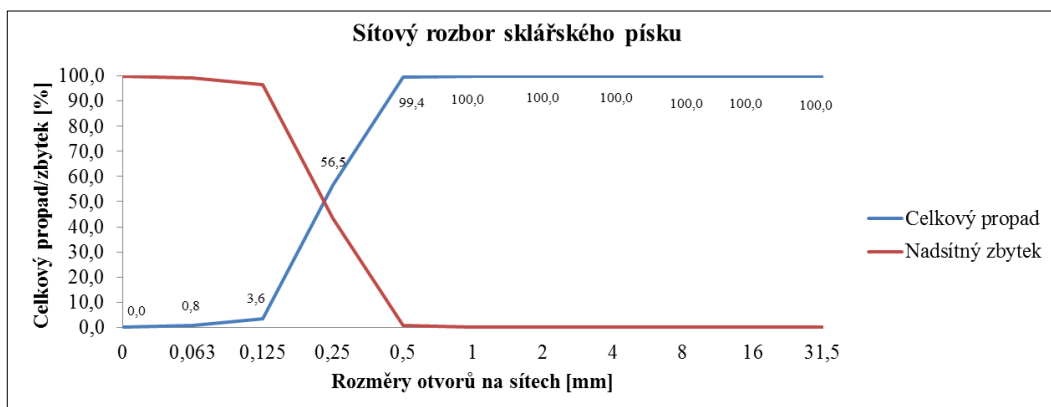
Rozměry otvorů na sítěch [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na sítě [g]	1,2	5,3	26,4	8,6	3,2	5,3	32,5	17,5	0,0	0,0	0,0	100,0
Váhový zbytek na sítě [%]	1,2	5,3	26,4	8,6	3,2	5,3	32,5	17,5	0,0	0,0	0,0	
Nadsítný zbytek [%]	100,0	98,8	93,5	67,1	58,5	55,3	50,0	17,5	0,0	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	1,2	6,5	32,9	41,5	44,7	50,0	82,5	100,0	100,0	100,0	

Granulometrie popílku Dětmárovice.



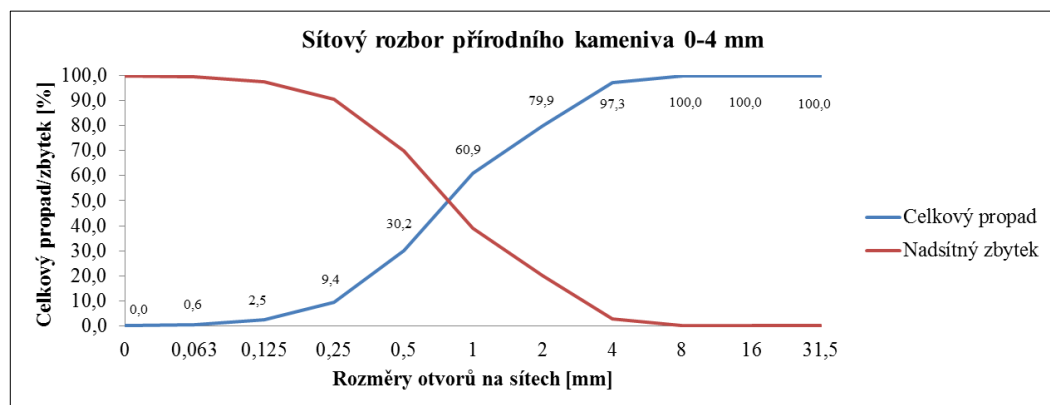
Rozměry otvorů na sítěch [mm]	0	0,063	0,09	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na sítě [g]	88,5	6,2	3,1	2,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	101,8
Váhový zbytek na sítě [%]	86,9	6,1	3,1	1,9	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Nadsítný zbytek [%]	100,0	13,1	6,9	3,9	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	86,9	93,1	96,1	98,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

Granulometrie sklářského písku.



Rozměry otvorů na sítích [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na sítě [g]	1,7	5,5	106,3	86,0	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	200,8
Váhový zbytek na sítě [%]	0,8	2,7	52,9	42,8	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Nadsitný zbytek [%]	100,0	99,2	96,4	43,5	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	0,8	3,6	56,5	99,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

Granulometrie přírodního plniva zrnitosti 0 – 4 mm.



Rozměry otvorů na sítích [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na sítě [g]	2,5	7,4	27,9	83,6	123,4	76,2	69,8	11,0	0,0	0,0	0,0	401,8
Váhový zbytek na sítě [%]	0,6	1,8	6,9	20,8	30,7	19,0	17,4	2,7	0,0	0,0	0,0	
Nadsitný zbytek [%]	100,0	99,4	97,5	90,6	69,8	39,1	20,1	2,7	0,0	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	0,6	2,5	9,4	30,2	60,9	79,9	97,3	100,0	100,0	100,0	

PŘÍLOHA B: RECEPTURY MODIFIKOVANÝCH POTĚROVÝCH HMOT

HOTOVÉ RECEPTURY			
	Název receptury	Plnivo	Pojivo
1	REF A	100 % sklářský písek	*) CEM I 42,5 R Hranice + 20 % Popílek Dětmorvice + aditiva
2	REF B	100 % sklářský písek	
3	20 % LIAPOR	80 % sklářský písek 20 % LIAPOR 1/4 mm	
4	20 % LIAPOR + 10 % PERLIT	70 % sklářský písek 20 % LIAPOR 1/4 10 % expandovaný perlit EP 100	
5	40 % LIAPOR	60 % sklářský písek 40 % LIAPOR 1/4 mm	
6	40 % LIAPOR + 10 % PERLIT	50 % sklářský písek 40 % LIAPOR 1/4 mm 10 % expandovaný perlit EP 100	
7	60 % LIAPOR	40 % sklářský písek 60 % LIAPOR 1/4	
8	20 % Q-CEL-7014	80 % sklářský písek 20 % Mikrosféry Q-CEL-7014	
9	40 % Q-CEL-7014	60 % sklářský písek 40 % Mikrosféry Q-CEL-7014	
10	60 % Q-CEL-7014	40 % sklářský písek 60 % Mikrosféry Q-CEL-7014	
11	20 % W-300	80 % sklářský písek 20 % Mikrosféry W-300	
12	40 % W-300	60 % sklářský písek 40 % Mikrosféry W-300	
13	60 % W-300	40 % sklářský písek 60 % Mikrosféry W-300	

*) CEM I 42,5 R Hranice + aditiva

RECEPTURY			
-----------	--	--	--

	Název receptury	Plnivo	Pojivo
14	40 % GEOCELL	60 % sklářský písek 40 % expandovaný skelný odpad GEOCELL 0/4 mm	CEM I 42,5 R Hranice + 20 % Popílek Dětmorovice + aditiva
15	40 % GEOCELL+ 5 % Q-CEL-7014	55 % sklářský písek 40 % expandovaný skelný odpad GEOCELL 0/4 mm 5 % Mikrosfěr Q-CEL-7014	
16	60 % GEOCELL	40 % sklářský písek 60 % expandovaný skelný odpad GEOCELL 0/4 mm	
17	60 % GEOCELL+ 5 % Q-CEL-7014	35 % sklářský písek 60 % expandovaný skelný odpad GEOCELL 0/4 mm 5 % Mikrosfěr Q-CEL-7014	
18	20 % PORAVER	80 % sklářský písek 20 % expandované sklo PORAVER 1/2 mm	
19	20 % PORAVER + 5% Q-CEL-7014	75 % sklářský písek 20 % expandované sklo PORAVER 1/2 mm 5 % Mikrosféry Q-CEL-7014	
20	40 % PORAVER	60 % sklářský písek 40 % expandované sklo PORAVER 1/2 mm	
21	40 % PORAVER + 5% Q-CEL-7014	55 % sklářský písek 40 % expandované sklo PORAVER 1/2 mm 5 % mikrosféry Q-CEL-7014	
22	60 % PORAVER	40 % sklářský písek 60 % expandované sklo PORAVER 1/2 mm	
23	60 % PORAVER + 5% Q-CEL-7014	35 % sklářský písek 60 % expandované sklo PORAVER 1/2 mm 5 % mikrosféry Q-CEL-7014	

RECEPTURY			
-----------	--	--	--

	Název receptury	Plnivo	Pojivo
24	40 % LIAPOR + 15 % VERMIKULIT	45 % sklářský písek 40 % LIAPOR 1/4 15 % expandovaný vermikulit SUPERFINE	CEM I 42,5 R Hranice + 20 % Popílek Dětmorovice + aditiva
25	40 % Q-CEL-7014 + 15 % VERMIKULIT	45 % sklářský písek 40 % Mikrosfěr Q-CEL-7014 15 % expandovaný vermikulit SUPERFINE	
26	40 % PORAVER + 15 % VERMIKULIT	45 % sklářský písek 40 % expandované sklo PORAVER 1/2 mm 15 % expandovaný vermikulit SUPERFINE	
27	40 % GEOCELL + 15 % VERMIKULIT	45 % sklářský písek 40 % expandovaný skelný odpad GEOCELL 0/4 mm 15 % expandovaný vermikulit SUPERFINE	
28	40 % W300 + 15 % VERMIKULIT	45 % sklářský písek 40 % Mikrosféry W-300 15 % expandovaný vermikulit SUPERFINE	